

## Automação e Sistemas de Segurança em Caldeiras de Recuperação Química

Ronaldo Ribeiro ([ronaldo.ribeiro@cenibra.com.br](mailto:ronaldo.ribeiro@cenibra.com.br)), Edison Strugo Muniz ([emuniz@klabin.com.br](mailto:emuniz@klabin.com.br)), Luiz Henrique Falcão Lamarque ([lhfl@aracruz.com.br](mailto:lhfl@aracruz.com.br)), Rajendra Kumar Mehta ([mehta@smar.com.br](mailto:mehta@smar.com.br)) e Song Won Park ([songwon.park@poli.usp.br](mailto:songwon.park@poli.usp.br)).

### Introdução

Mundialmente, a indústria de celulose e papel vive um grande florescimento. Considerando que América de Norte e Europa Ocidental não expandem seus parques industriais, a consequência é que a maior parte do aumento da capacidade de produção se deve à América do Sul e Ásia, produzindo polpas celulósicas a partir de madeiras de espécies folhosas, de rápido crescimento, diminuindo cada vez mais as emissões gasosas, maximizando a geração de energia, minimizando consumo de eletricidade e aumentando sempre o seu potencial de geração de energia elétrica dentro da fábrica. Nos últimos dez anos, quase um terço da expansão é decorrente de construção de novas unidades fabris, e o restante é decorrente da modificação de unidades já existentes. O caráter cíclico de recuperação de reagentes e a capacidade de geração de energia própria em caldeiras de recuperação química têm o papel essencial no sucesso deste setor industrial. Hoje, uma unidade industrial nova (*green field mill*) é um empreendimento de 2-5 bilhões de dólares e uma caldeira de recuperação atinge facilmente 200-600 milhões de dólares.

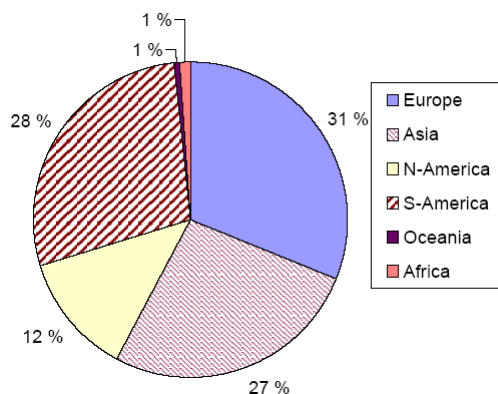


Figura 1 – Distribuição de novas capacidades de recuperação química <sup>[1]</sup>.

O processo Kraft de produção de fibras, ou polpas, de celulose a partir de madeira, utiliza como reagentes principais soda ( $\text{NaOH}$ ) e sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) em uma solução denominada licor branco para modificar, dissolver e retirar a lignina da madeira em uma solução denominada licor preto. Cada tonelada de polpa celulósica gera 10 toneladas de licor preto diluído ou fraco, que deve ser concentrado a acima de 75% de teor de sólidos. Ainda assim, estes 1,5 toneladas de sólidos secos totais, para cada tonelada de polpa produzida, são capazes de gerar considerável energia térmica e elétrica na fornalha de

recuperação, conhecida como caldeira de recuperação química. Note-se na figura 2, o caráter cíclico da recuperação química com alta eficiência [2], de aproximadamente 97%.

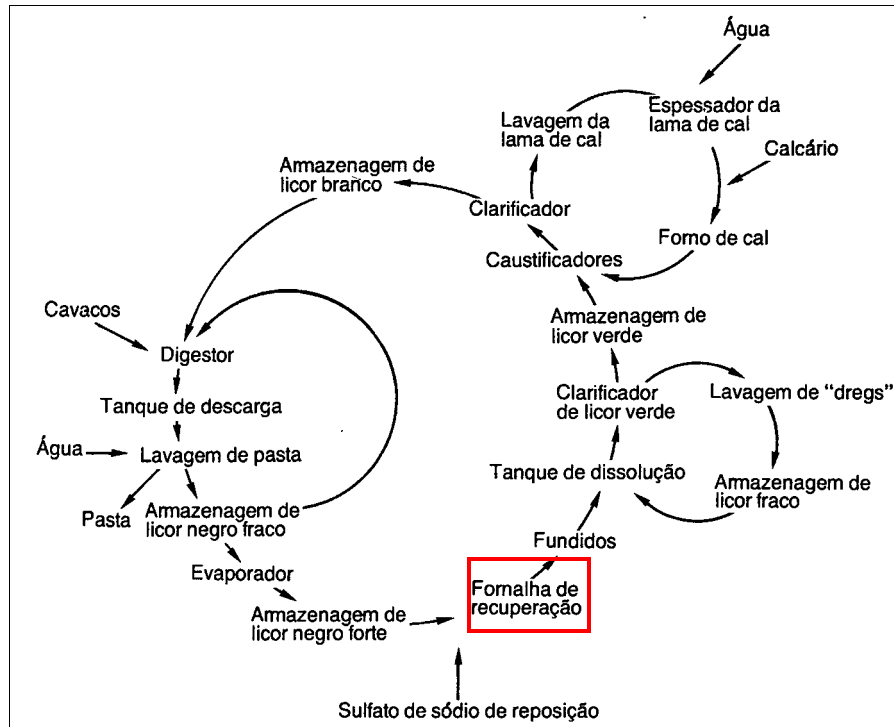


Figura 2 – Processo Kraft de polpa celulósica, evidenciando o caráter cíclico de recuperação [3]

Portanto, a caldeira de recuperação tem a função de incinerar a carga poluente do licor preto para minimizar impacto ambiental, gerar energia térmica, co-gerar energia elétrica, e recuperar os reagentes inorgânicos. O licor preto concentrado é espalhado no interior da fornalha, onde passa por secagem, pirólise, gaseificação e cai no leito. A combustão no leito é controlada em ambiente redutor, de pouco oxigênio, de modo que se forme  $\text{Na}_2\text{S}$ . Este sulfeto, junto com carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), forma a maior parte de inorgânicos que, nesta fornalha de alta temperatura, escoam como material fundido para subsequentes tratamentos de recuperação de soda através de reação de ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) com cal ( $\text{CaO}$ ) produzindo soda ( $\text{NaOH}$ ) solúvel em água que voltará ao processo de polpação de cavacos como licor branco, e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) sob forma de lama de cal que será lavado, calcinado em forno para recuperar novamente ( $\text{CaO}$ ) e voltará ao processo de reação de produção de soda.

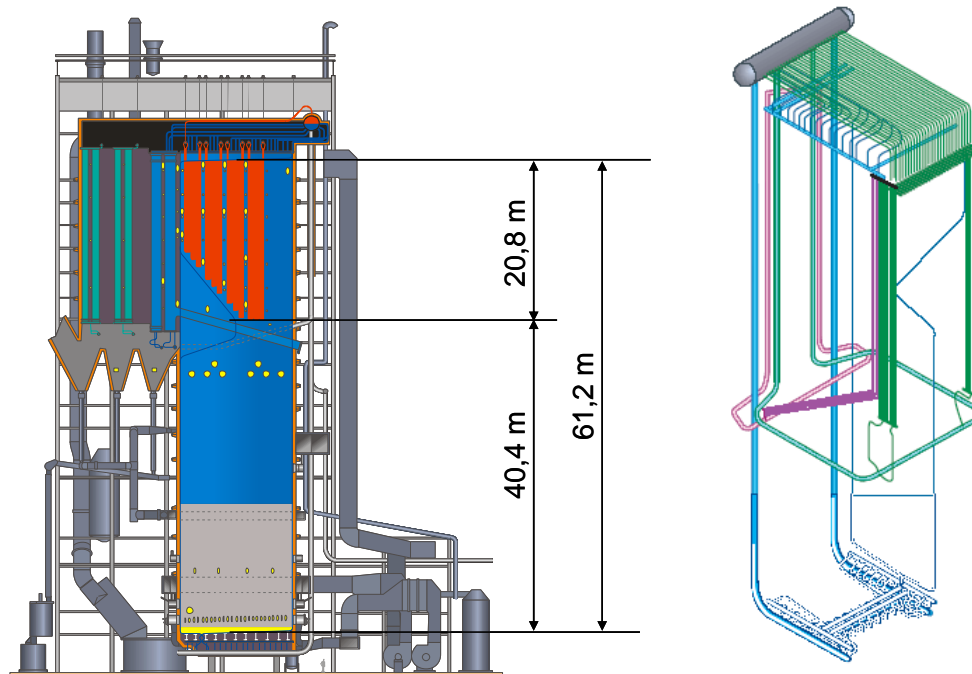


Figura 3 – Esquema típico de uma moderna caldeira de recuperação<sup>[1]</sup> e seu sistema de circulação de água<sup>[12]</sup>.

A figura 3 ilustra uma caldeira moderna de recuperação. Além desta recuperação química, a queima dos compostos orgânicos do licor preto na caldeira de recuperação serve como combustível para gerar vapor, tanto como energia térmica do processo como veículo para gerar energia elétrica. Por isso as caldeiras são cada vez maiores em tamanho para maior eficiência global, com maior capacidade de produção devido a aumento de escala industrial, e com maiores temperatura ( $480^{\circ}\text{C} \rightarrow 510^{\circ}\text{C}$ ) e pressão ( $84 \text{ bar} \rightarrow 110 \text{ bar}$ ) de vapor de operação para gerar mais energia. Para cada kg de licor preto calcula-se a disponibilidade de 15000 kJ de energia, o que significa com as devidas eficiências inclusas, a geração de 3,5 kg de vapor. Cada 2000 t/dia de produção de polpa celulósica podem gerar 3000 t/dia de sólidos de licor preto, o que pode resultar na prática 50-70 MW de energia elétrica, podendo chegar, em caldeiras modernas, a gerar a 10000 t/dia de vapor a  $510^{\circ}\text{C}$  e 110 bar e 1800 MWh/dia de energia elétrica<sup>[2]</sup>. Estes números significam que uma caldeira de recuperação moderna consegue suprir a energia elétrica de uma cidade média do Brasil. Esta é a razão por que se diz que licor preto é a quinta fonte global de energia, ficando atrás apenas de carvão, óleo, gás e gasolina. A tabela I apresenta o levantamento<sup>[4]</sup> de caldeiras realizado em 2005, com 38 caldeiras, das quais 32 em operação, e 4 em montagem, com 10 caldeiras novas ou reformadas em últimos 3 anos. Muitas novas caldeiras e reformas ainda serão realizadas além desta tabela I.

TABELA I – Cadastro geral de caldeiras de recuperação no Brasil em 2005<sup>[4]</sup>.

	Empresa	Fabricante	ano	reforma	capacidade (t seco/dia)	P (bar)	T (C)	Vapor (t/h)	Área base m2
1	Aracruz	Kvaerner	2001		3700	84	450	524.0	156.7
2	Aracruz	Gotaverken	1991	2002	3700	64	455	524.0	165.0
3	Aracruz	Ahlstrom Gotaverken	1997	2000	3100	64	455	455.0	131.0
4	Aracruz	(a)	1971		1200	64	460	160.0	77.0
5	Aracruz Bahia	B&W	2002		1950	64	460	300.0	125.0
6	Pulp Bahia	CBC	1995	1999	900	63	450	130.0	43.0
7	Pulp	CBC	2007		3300	85	490	494.0	149.2
8	Bahia Sul	Gotaverken	1992	2001	3200	85	484	420.0	144.0
9	Bahia Sul	Kvaerner	2007		4700	85	484		251.0
10	Cenibra	CBC	1997	2003	1800	66	450	250.0	94.0
11	Cenibra	CBC	1992	2004	2500	66	450	422.0	138.0
12	Cenibra	CBC	2005		3500	66/86	450/480	524/515	189.0
13	Cocelpa	Gotaverken	1988		220	45	425	30.0	12.0
14	Iguaçu	São Caetano	1972		104	16	204	24.0	17.2
15	Int Paper	B&W	1976		315	29	350	34.9	14.0
16	Int Paper	B&W	1985	2006	1050	29	350	140.0	51.9
17	Itapagé Jari-	CBC	1972		175	42	400	14.5	10.5
18	ORSA	B&W/Gotaverken	1979	1988	1550	65	450	210.0	89.0
19	Klabin CP	CBC	1987		800	85	480	95.0	49.0
20	Klabin PR Klabin	Gotaverken	1977	2003	2000	46	430	265.0	92.5
21	OC Klabin	Gotaverken	1987		420	41.1	400	54.0	24.1
22	OC	CBC	1988		1000	87.2	483	145.0	69.1
23	Lwarcel	CBC	2002		630	85	480	85.0	43.9
24	Nobrecel	SteinRobaix/CBC	1999	2006	270	45	450	37.0	16.0
25	Orsa	Gotaverken	1982		260	19	200	30.0	12.6
26	Orsa	CBC	2006		400	42	400	74.0	26.0
27	Rigesa	B&W	1987		250	43	370	35.4	18.3
28	Rigesa	Ahlstrom	1999		600	64	460	126.0	47.4
29	Ripasa	Gotaverken	1972		520	42	400	72.0	24.1
30	Ripasa	Gotaverken	1981		530	42	400	72.0	24.1
31	Ripasa	CBC	2002		1100	42	400	180.0	69.5
32	Suzano	Gotaverken	1973	2004	750	50	420	100.0	49.0
33	Suzano	CBC	1987	2002	960	50	420	145.0	64.0
34	Trombini	B&W/Orcepa	1989	2000	185	21	400	25.0	9.0
35	VCP-LA	CBC/Andritz	1991	2005	1550	64	450	245.0	66.0
36	VCP-JC	CBC	1994		1700	88	480	245.0	103.0
37	VCP-JC	CBC	2002		2760	88	480	392.0	149.0
38	Veracel	Kvaerner	2005		4000	94	490	620.0	212.0

Obs.: (a) hibernado, (b) em montagem ou fabricação.

## Incidentes em Caldeiras de Recuperação

Muitos problemas podem ocorrer com caldeiras de recuperação, incluindo incrustação e entupimento de banco de tubos, corrosão e ruptura de tubos, má circulação interna de água, explosão de água em fundidos, escoamento instável de fundidos, emissões e apagamentos de fornalhas, tudo isso afetando a segurança e boa operação de caldeiras. Os incidentes em caldeiras são classificadas de acordo com as seguintes definições:

- Crítico: Casos onde água, em qualquer quantidade tenha atingido a fornalha da caldeira de recuperação;
- Não crítico: Casos onde água ou vapor, em qualquer quantidade, tenha vazado, mas sem entrada de água na fornalha da caldeira de recuperação•Explosão no tanque de dissolução; e
- Acidente: Casos aonde a integridade da caldeira de recuperação ou de seus operadores e mantenedores tenha sido colocada em risco.

Segundo Afonso Pereira <sup>[4]</sup>, houve 51 eventos em 64 meses, e em primeiros cinco meses de 2006, a título de ilustração, com 580 horas totais de paradas de operação, ocorreram no Brasil seguintes incidentes pela ordem cronológica:

- crítico – vazamento em tubo da parede traseira.
- não crítico – vazamento em tubo de alimentação e economizador e tubo.
- crítico – vazamento em screen.
- não crítico – vazamento em fornalha inferior externo.
- não crítico – vazamento em tubo de economizador.
- não crítico – vazamento em economizador.
- acidente – explosão durante lavagem com água.
- acidente – vazamento tanque de dissolução.

Ainda em 2005, em USA, entre 181 caldeiras com idade média de 31 anos, e capacidade média de 1300 t de licor seco por dia, houve 39 incidentes com 2955 horas perdidas, das quais um evento com 1000 horas, distribuídos em:

- o 56% economizador
- o 4% banco gerador
- o 8% superaquecedor
- o 16% fornalha
- o 8% tanque de dissolução
- o 8% outros.

Na Finlândia, em 2005, entre 21 caldeiras de recuperação com idade média de 22 anos, e capacidade média de 2000 t de licor seco por dia, houve 12 incidentes com 520 horas paradas distribuídos em:

- o 33% economizador
- o 25% banco gerador
- o 17% superaquecedor
- o 17% fornalha
- o 8% tanque de dissolução

Neste levantamento, verificou-se que 25% dos eventos estavam relacionados com processo, 25% com procedimentos de solda, 17% com fadiga, 17% com falhas de execução, 8% com erros de montagem e 8% com a química da água. Discute-se aqui brevemente estes três primeiros e principais motivos de incidentes. Em relação aos eventos relacionados com o

processo, a prevenção de explosão, em particular as de contato de água com inorgânicos fundidos do leito da caldeira, é a alta prioridade para a indústria. Muita da responsabilidade e mérito para esta prevenção está sob o cargo de operador que deve monitorar um grupo de variáveis que se relacionam de modo complexo, e utilizando de informações suplementares tais como inspeção local, e visual, deve decidir quando se trata de uma situação catastrófica de ruptura de tubos, ou se trata de distúrbios de processos de natureza menos crítica. O operador tem autonomia total e independente para decidir quando se deve disparar um procedimento de corte de combustível ou *trip* de licor preto, e de procedimento de paradas de emergência.

*TABELA II – Variáveis e parâmetros principais para operação da caldeira.*

<p>Tanque de mistura de cinzas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- vazão de entrada</li> <li>- vazão de saída</li> <li>- nível do tanque</li> </ul>	<p>Licor preto</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- densidade</li> <li>- sinal de mudança</li> <li>- vazão</li> <li>- teor de sólidos totais</li> <li>- pressão</li> <li>- temperatura</li> <li>- sinal de <i>trip</i></li> </ul>
<p>Água da caldeira</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- vazão</li> <li>- pressão de cabeça</li> </ul>	<p>Ventiladores</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- atuação de controle de exaustor</li> <li>- sinal de alarme de falha</li> <li>- velocidade de exaustor</li> <li>- vazão de ar primário</li> </ul>
<p>Produção do vapor</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- pressão de distribuidor</li> <li>- taxa de produção</li> <li>- temperatura</li> </ul>	<p>Fornalha</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- pressão</li> <li>- temperatura</li> </ul>
<p>Gases de exaustão</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- umidade</li> <li>- opacidade</li> <li>- teor de oxigênio</li> <li>- pressão (em vários pontos)</li> <li>- temperatura (em vários pontos)</li> <li>- TRS (enxofres reduzidos totais)</li> </ul>	<p>Licor verde e licor branco</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- densidades</li> <li>- composições</li> </ul>
<p>Balão do vapor</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- nível e seus alarmes</li> <li>- pressão</li> </ul>	<p>Inspeção visual</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- cinzas</li> <li>- leito da fornalha</li> <li>- saída de fundidos</li> <li>- injeção de licores pretos</li> <li>- sistema de ar no interior da fornalha</li> </ul>
<p>Balanços materiais de água</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- taxa de alimentação</li> <li>- vazão de purga</li> <li>- vazão de vapor de soprador de fuligem</li> <li>- vazão de licor preto</li> <li>- teor de sólidos de licor preto</li> <li>- nível e pressão do balão</li> <li>- produção do vapor</li> </ul>	

Assim como operador utiliza várias informações para diagnosticar se a situação é crítica, o engenheiro de processo sabe que iniciar um procedimento de parada de emergência tem seus custos de longo tempo de execução e re-partida, e possíveis danos devidos a tensões de resfriamento deste procedimento de emergência. Por isso, para quem monitora o processo o balanço de massa de água e de compostos químicos, da tabela II, além de inspeção acústica, é extremamente útil.



Cuidados com os procedimentos de solda está diretamente relacionada com eventos de riscos na caldeira, e desde que a inspeção de tubos também está relacionada com esta atividade, é conveniente rever com cuidado bons textos tais como a monografia de Agostinho Salgado Alves [5] que discute as boas práticas de manutenção em partes pressurizadas nos circuitos de água e vapor em caldeiras de recuperação química, assunto difícil de encontrar em literatura aberta, com as várias etapas que são levadas em consideração tais como: preparação da caldeira para a execução dos reparos com limpeza, análise de falhas e também mostrar e maneira prática e ilustrativa as várias técnicas de manutenção.



Figura 4 – Soldas e inspeção requer técnicas especiais para prevenção de incidente [5].

Além de soldas, fadiga, falha de montagem, corrosão e erosão estão em terceiro lugar entre as causas de ruptura de tubos. Detecção de fugas de vapor e água pelos tubos é muito importante e pode ser visto em trabalho de Jules Gommi [9]. Ruptura em tubos necessariamente é um incidente geograficamente localizado. Junto com banco gerador, superaquecedor e economizador, outra região crítica para acidentes é a parte inferior da fornalha [10], seus adjacentes com as paredes de membrana de tubos, e a parte adjacente à saída de fundidos, todas as regiões onde atualmente utiliza-se modernos tubos compósitos. As rupturas ali ocorrem por falhas de soldas, por tensão de alongamento ou de compressão, ou inicia-se pelo ponto de corrosão em material compósito, denominado SCC (*stress corrosion cracking*), combinada com a fadiga térmica.

Depois de detectado um incidente suficientemente crítico para disparar procedimento de parada de emergência, o risco de explosão não termina aqui. Como o resfriamento da fornalha é lenta, deve-se proceder ao pós-operação, que trata de acelerar o resfriamento, em grande maioria baseada em extinção por uma grande quantidade de carbonato de sódio. Esta etapa, denominada de pós-procedimento de parada de emergência (*post-ESP*), deve ser rigidamente monitorada devido a riscos também de explosão <sup>[11]</sup>.

### **Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil**

Devido a estes aspectos importantes de segurança, os profissionais envolvidos na área de recuperação química são muito organizados e trabalhos cooperativos entre si, comprometidos com o levantamento de toda e qualquer atividade de procura de causa e solução de incidentes e acidentes. A idéia de base que sustenta esta cooperação é que acidentes podem ter conseqüências tão graves que nada justifica ocultar, manter sigilo ou não colaborar e não compartilhar a experiência de investigação das causas e medidas posteriormente recomendadas.

Em América de Norte, por exemplo, existe a associação BLBRAC, (*Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee*) com o propósito de gerar procedimentos seguros e diretrizes que governem a operação das caldeiras de recuperação química. Esta organização foi fundada em 1961 por vários grupos de profissionais da área, alarmados com o número de explosões que resultavam em injúrias e mortes de operadores de caldeiras. Estes grupos consistiam de Companhias de Seguros, Fabricantes de Caldeiras, e Empresas de papel e Celulose, cujos profissionais estavam envolvidos em operação, seguro, ou manufatura de caldeiras de recuperação química. Hoje BLBRAC tem um número de subcomitês ativos que constantemente revisam e atualizam diretrizes de segurança para refletir conhecimento e tecnologias atuais. Além de relatórios, acompanhamento de caldeiras, e encontros anuais para discutir incidentes, BLBRAC tem produzido manuais de boas práticas, das quais as mais relevantes constam da tabela III.

*TABELA III – Manuais de recomendações de BLBRAC.*

#### **Recommended Good Practice from Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee**

*Fire Protection in Direct Contact Evaporators and Associated Equipment*

*Safe Firing of Auxiliary Fuel in Black Liquor Recovery Boilers*

*Safe Firing of Black Liquor in Black Liquor Recovery Boilers*

*Waste Stream Incineration*

*Emergency Shutdown Procedure (ESP)*

*Application of Rotork Actuators on Black Liquor Recovery Boilers*

*Post ESP Water Level*

*Checklist and Classification Guide for Instruments and Control Systems*

*Personnel Safety & Training*

*Post ESP Guidelines*

No Brasil, existe um comitê muito ativo, CSCRB (*Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil*) afiliado a Associação Técnica Brasileira em Celulose e Papel, pois todos os seus membros são participantes ativos de Comissão Técnica de Recuperação e Utilidades desta associação. Porém CSCRB é uma entidade independente, sem fins



lucrativos, e se dedica a melhorar a segurança das caldeiras de recuperação brasileiras através da disseminação de informações técnicas e estatísticas, e coopera ativamente com os seus congêneres FRBC (*Finnish Recovery Boiler Committee* e *Sodahuskomiteen*) de Finlândia e BLRBAC (*Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee*) de América de Norte. CSCRB é composto por profissionais com experiência nas indústrias nacionais de celulose, no setor de serviços ligados à área de recuperação química. O grupo, que promove duas reuniões anuais, desenvolve trabalhos de forma contínua através da interação entre os membros. A entidade foi fundada em 1999, inspirada pelo crescente parque de caldeiras de recuperação do Brasil, atualmente um dos maiores do mundo. Vários documentos contendo recomendações de Boas Práticas operacionais e de manutenção, além de metodologia para reportar e registrar incidentes com caldeiras e recuperação brasileiras, figuram entre as principais realizações até o momento. Em 2002, por exemplo, o Comitê traduziu e divulgou da lista constante na tabela III, as recomendações de “*Práticas recomendadas para oxidação térmica de gases não-condensáveis em caldeiras de recuperação*” [7], e a “*Lista de checagem de instrumentação e guia de classificação para instrumentos e sistemas de controle usados na operação de caldeiras de recuperação*” [8]. Posteriormente CSCRB publicou a “*Guia de inspeção de Caldeiras de Recuperação*” [6], atualmente com segunda revisão em 2004. Segundo Flávio Paoliello, a recomendação foi produzida por razões de segurança, normas técnicas e legais vigentes no Brasil que indicam a necessidade da realização de inspeções regulares em caldeiras de qualquer tipo. Estas normas estabelecem procedimentos, prazos, responsabilidades e demais requisitos para as inspeções. Há um reconhecimento geral, na indústria de celulose, de que a segurança das caldeiras de recuperação de álcalis requer cuidados de inspeção que vão além das exigências oficiais para geradores de vapor em geral, contidas nas normas gerais, isto é, o escopo técnico deve ser definido de modo que seja aplicável à inspeção periódica de caldeiras de recuperação e, portanto, o guia deve delinear e complementar o escopo recomendável de exames, de forma coerente com a criticidade e o risco associado às caldeiras de recuperação de álcalis da indústria de celulose.

### **Comissão Técnica de Automação de ABTCP**

Outros três manuais de recomendações da tabela III, também de grande importância, ainda não foram publicadas no Brasil: *Personnel Safety & Training*, *Safe Firing of Black Liquor in Black Liquor Recovery Boilers* e *Emergency Shutdown Procedure (ESP)*. Em 2002, Edison Strugo Muniz e Ronaldo Ribeiro, cada um em sua diferente unidade industrial, sentiram a necessidade de rever ao menos estas duas normas relativas à lógica de controle e automação. Em primeiro lugar porque tanto o sistema lógico do “Procedimento de Parada e Drenagem de Emergência” quanto o sistema lógico de “Queima Segura de Licor Preto em Caldeiras de Recuperação Química” estão relacionados diretamente a implementação de intertravamentos, instrumentação, atuadores e hardware, e em segundo lugar, devido à relevância que ocupa estes sistemas na caldeira e o fato destas normas serem na época pouco compreendidas e mal questionadas. A figura 5 ilustra esquematicamente o circuito de queima de licor negro, que é o combustível principal da caldeira de recuperação.

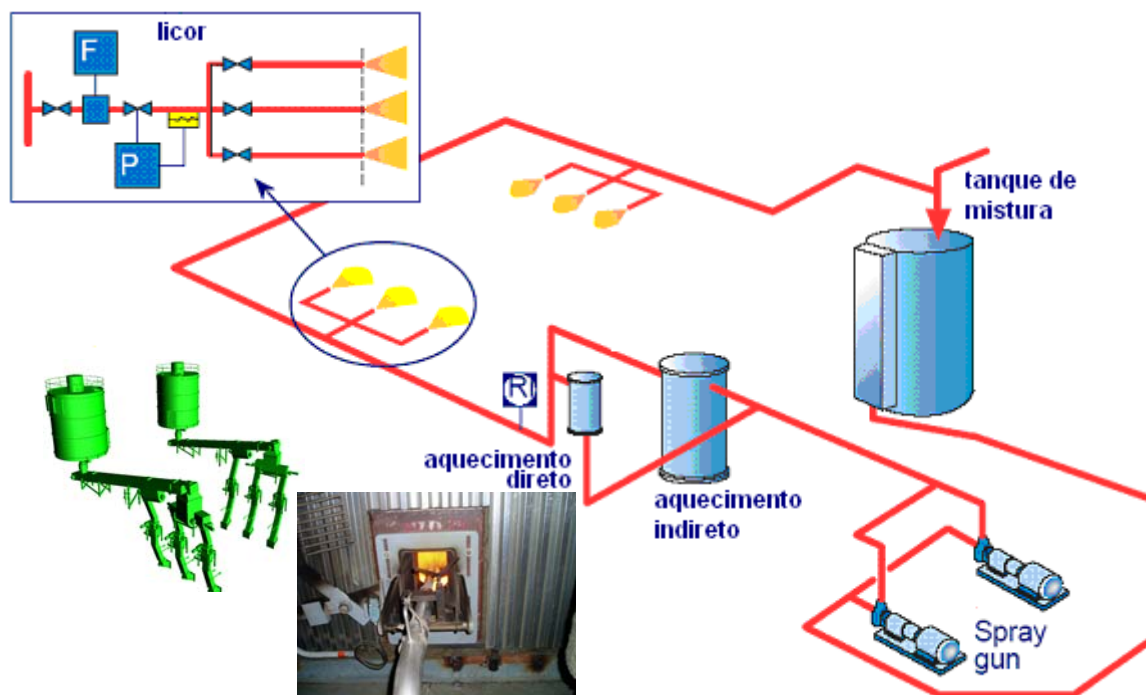


Figura 5 – Sistema de queima de licor preto <sup>[12]</sup>.

Rajendra Kumar Mehta, coordenador em 2003 da Comissão Técnica de Automação da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, solicitou que seus membros Luiz Henrique Falcão Lamarque, Edison Strugo Muniz e Ronaldo Ribeiro <sup>[13]</sup> discutissem em mesa-redonda estas questões de ponto de vista de especialistas de automação, ou seja, apesar de recomendações e normas discutidas pelos engenheiros de processos da área de recuperação química, deveria haver uma contribuição relevante de automação sob o ponto de vista de SIS (sistema de instrumentação de segurança). Seguem-se os principais tópicos levantados: Nenhuma recomendação promulgada garantirá a eliminação de explosões em fornalhas, e a tecnologia está em desenvolvimento contínuo. Ainda mais, as recomendações baseadas no estado presente da arte podem não ser aplicáveis a projetos e instalações mais antigas. Caldeiras de recuperação de licor preto apresentam desafios em função de exigências de serviço, operação, queima de combustível muito específico, e questões de confiabilidade, margem de segurança e manutenção. Estes aspectos devem ser analisados sob o ponto de vista de automação com SIS (sistema instrumentado de segurança), lógica SAMA (*Scientific Apparatus Manufactures Association*) de representação de toda as seqüências da filosofia de controle, através de símbolos e diagramas, e descrição de IHM (Interface Homem-Máquina). De ponto de vista físico, discutiram-se diretrizes relativos a Modo à Prova de Falhas, Fontes de Energia, *Back-up* (Reserva Automático ou *Hard Wired*), Malhas Críticas, e Comunicações de Controle. Ainda mais, Sistema Instrumentado de Segurança deve, por definição, interromper um processo e iniciar uma seqüência segura pré-determinada caso aconteça uma condição insegura, e deve ser analisado na sua composição em relação a sensores, lógicas (sistema elétrico, eletrônico ou eletrônico programável), dispositivos finais, interconexões e interfaces para outros sistemas. Os principais usos de conceito de SIS na caldeira de recuperação são os procedimentos de parada e drenagem de emergência, *trip* de combustível principal e *trip* de combustíveis

auxiliares. **Quando se verifica a sua implementação nas diversas caldeiras do Brasil, notava-se uma convivência de diversas lógicas e diversas tecnologias de diferentes idades, que incluíam relés eletrônicos e temporizados, lógica do tipo estado sólido, sistema eletrônicos programáveis, temporizadores motorizados, relés temporizados do tipo estado sólido, lógica tipo hard wired (redundante) e combinações destes itens citados.**

Ronaldo Ribeiro <sup>[13]</sup> sugeriu discutir seguintes recomendações: SIS deverá fornecer informações de falhas, deve ter proteção com senhas, não são permitidas modificações de lógica *on-line*, procedimento e documentos assinados para os *cheks*, memória pelos 7 dias de falta de energia, velocidade de 1 segundo ou menos na mudança de status dos componentes de campo, velocidade de 2 segundos ou menos das ações de *interlock* ou do operador para ações no campo, indicações operacionais dos dispositivos de campo baseadas no retorno positivo destes. Quando SIS é aplicado a parada de emergência, deveria se utilizados sistemas ou processadores redundantes para assegurar procedimentos de parada de emergência com segurança, nenhuma falha isolada deveria causar ou prevenir uma ocorrência do procedimentos de parada de emergência, a comutação por redundância, não poderá causar ação imprópria do procedimentos de parada de emergência, processadores redundantes deveriam ser testados preferencialmente 2 vezes ao ano, obrigatoriamente uma vez ao ano, falhas em processadores reservas deveriam incapacitar transferência até correção das falhas, um ponto alternativo também deveria ser provido se utilizado um sistema digital para o procedimentos de parada de emergência. SIS não deverá utilizar corrente contínua para reter estados de lógica. Ainda mais, nas caldeiras de recuperação química em operação tal como se reformavam fisicamente, mas esqueciam de atualizar a parte de controle e instrumentação, tinham-se caldeiras operando com sistemas diferentes de intertravamento e ficava a pergunta sobre a sua implicação legal perante seguradoras, os projetos cronologicamente de períodos diferentes, possuíam intertravamentos diferentes e existiam diferentes lógicas convivendo, tais como, por exemplo, caldeiras operando com “lógica negativa” (funcionando = 0) e “lógica positiva” (funcionando = 1).

Nessa discussão resultaram sugestões para Formação de Comitês de Segurança em Caldeiras de Recuperação em cada fábrica, aferição dos circuitos, lógicas e sistemas instalados com as normas e recomendações vigente, divulgação de casos e situações encontradas após esta aferição e também a forte sugestão de que projetos novos de caldeiras devem seguir sempre a última revisão das normas e recomendações.

Em 2004 e 2005, a Comissão de Automação da Associação Técnica Brasileira em Celulose e Papel discutir intensamente o melhor modo de contribuir com CSCRB (*Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil*) e Luiz Henrique Falcão Lamarque explicou que a tendência seria que todas as caldeiras se atualizassem e seguissem recomendações de BLRBAC, o que de fato está ocorrendo e, portanto, não cabia sugerir novas normas e sim levantar informações e ajudar a entender as implicações dos procedimentos recomendados e de suas diferenças em estilo de implementação em cada caldeira. Assim instalou-se um grupo de trabalho coordenado por Ronaldo Ribeiro e contado com os colaboradores Luiz Henrique Falcão Lamarque, Edison Strugo Muniz <sup>[14]</sup>, Rajendra Kumar Mehta e Song Won Park.

## Procedimento de Parada e Drenagem de Emergência

Vazamento de vapor dentro de fornalha não é tão crítico quanto a de água quanto a riscos de explosão em contato com fundidos em leito da caldeira.

Um procedimento de parada de emergência é iniciado por um operador a partir de acionamento de um botão quando se tem conhecimento (ou suspeita grave) de água, em qualquer quantidade, entrando para dentro da fornalha de combustão sem que se possa estancar esta água imediatamente. Neste caso, o procedimento, uma vez acionado, deve desempenhar automaticamente e imediatamente: ativação de alarme, encerramento de vazão de todos os combustíveis, encerramento de vazão de todos os ares, drenagem rápida de água de balão até 8 ft acima de piso de fornalha e drenagem do economizador da caldeira, e redução da pressão o mais rápido possível. A figura 6 ilustra este procedimento em forma de diagrama.

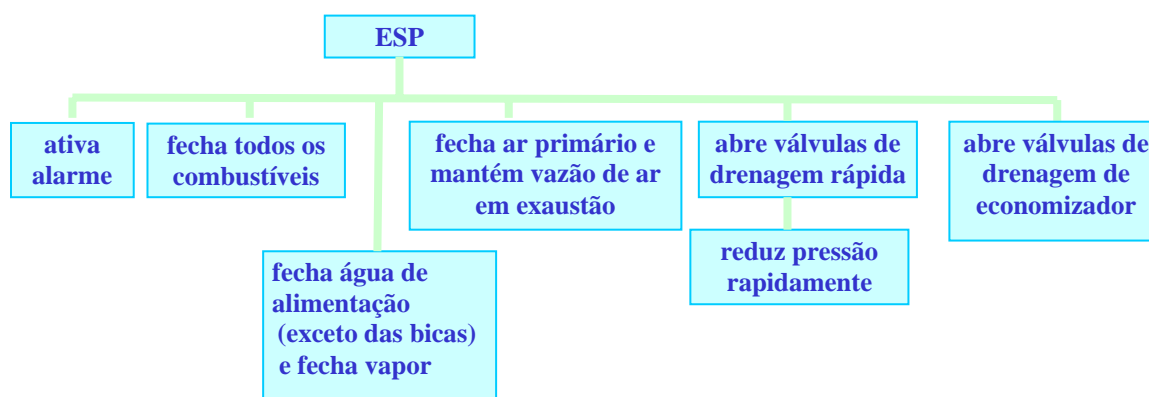


Figura 6 – Procedimento de parada e drenagem de emergência.

A simplicidade da figura 6 é ilusória. Tal é a quantidade de instrumentos e atuadores envolvidos, que a checagem de todos os detalhes pode ser muito trabalhoso. Um exemplo de verificação real <sup>[15]</sup> de uma caldeira está ilustrada na figura 7. Edison Strugo Muniz <sup>[14]</sup> apresentou a implementação de parada e drenagem de emergência para sua unidade industrial, conforme ilustrado na figura 8.

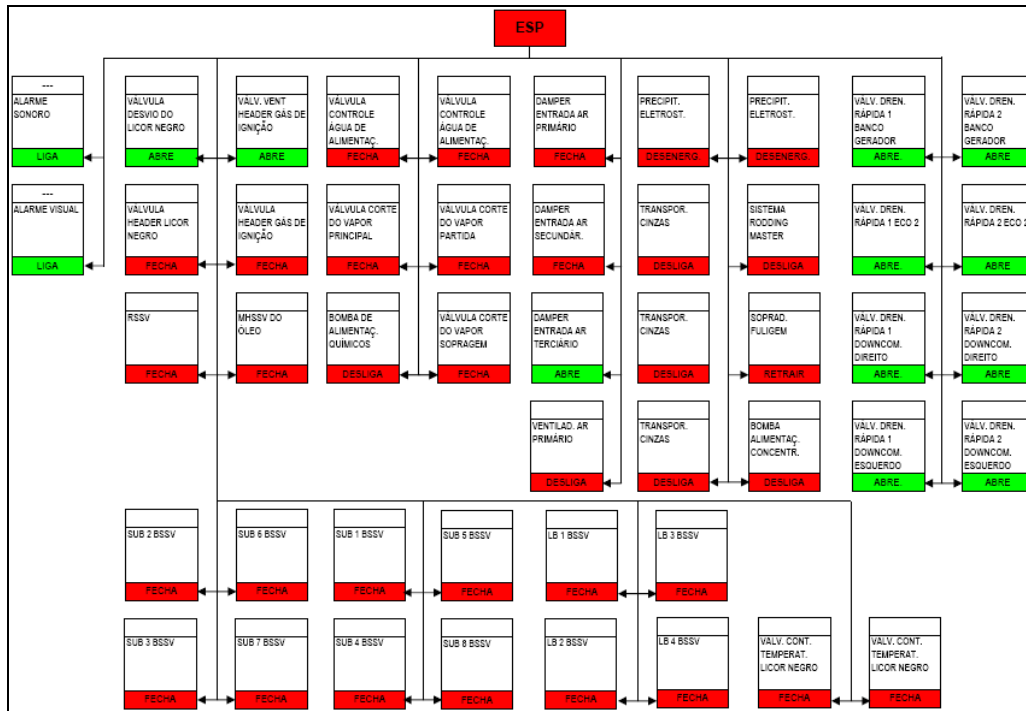


Figura 7 – Verificação de procedimento de parada e drenagem de emergência em relação aos instrumentos e atuadores <sup>[15]</sup>.



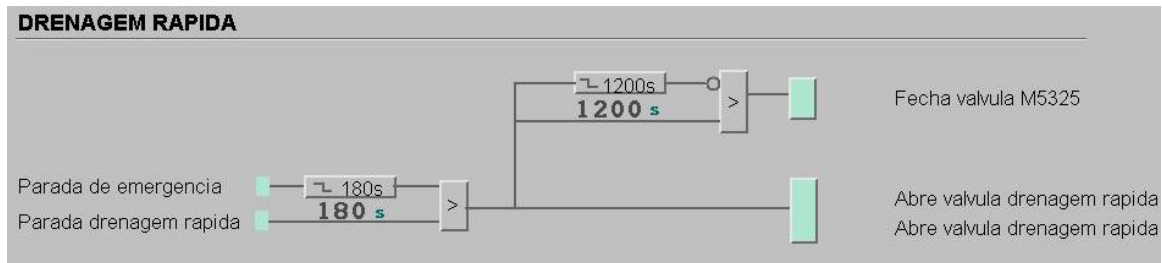


Figura 8 – Implementação lógica do procedimento de parada e drenagem de emergência em relação aos instrumentos e atuadores em outra caldeira <sup>[14]</sup>.

## Queima Segura de Licor Preto em Caldeiras de Recuperação Química

O manual de recomendações BLRBAC para queima segura de licor preto é relativamente extensa, e não será detalhada aqui, porque posteriormente será apresentada uma versão traduzida e comentada. O manual BLRBAC apresenta seguintes lógicas de queima segura de licor preto:

- Lógica de partida admissível comum
- Lógica de partida admissível comum para queima de licor preto
- Lógica de procedimento de parada de proteção comum
- Lógica de procedimento de parada de proteção comum para queima de licor preto

O diagrama da lógica de partida admissível comum para queima de licor preto pode ser visto diretamente no manual, e a explicação e comentários de cada sua etapa consta aqui na tabela IV. A figura 9 ilustra, a partir de uma caldeira em operação, um exemplo de implementação do diagrama da lógica de partida de queima de licor preto.



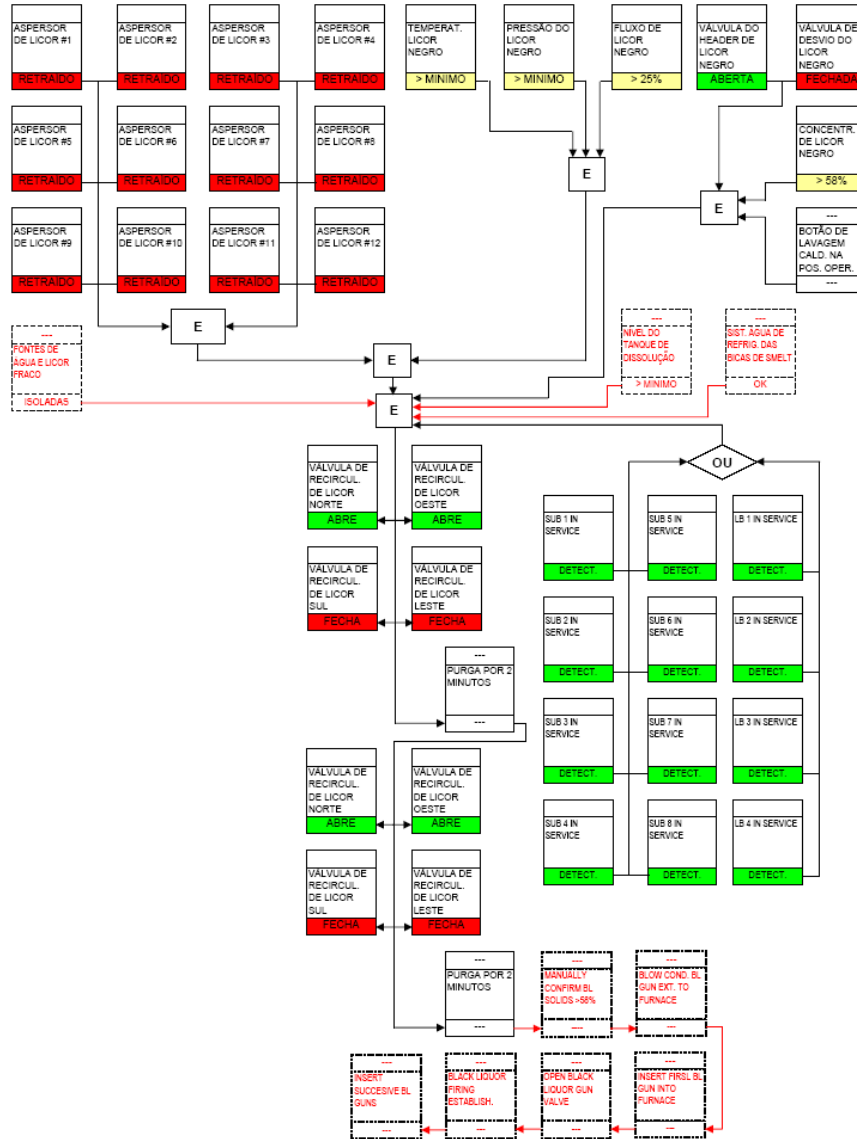


Figura 9 – Ilustração de exemplo de implementação do diagrama da lógica de partida [15] para queima de licor preto em uma fábrica.

TABELA IV – Procedimento de Partida para Licor Preto [16].

Diagrama Blocos da Lógica	Propósito	Protegido contra Perigo
Provado que todos os Queimadores de LP estão for a da fornalha	Prevenir queima insegura de LP e prevenir que água de lavagem entre na fornalha	Prevenir explosão água-smelt prevenir explosão de gás combustível
Interlock de Procedimento de parada de emergência satisfatório	Confirmar que os procedimentos de parada de emergência estão em progresso	
Partir bomba de LP	Bomba de LP partida como primeiro passo no estabelecimento do fluxo de LP	
Válvula do coletor de LP fechada e a de Desvio aberta	Fechar LP para o(s) coletor(es) da fornalha e desviar fluxo de licor	Possível introdução de sólidos baixos na fornalha

Manutenção de purga segura na caldeira (crédito de purga na fig. 1A)	Verificar se a fornalha já está pronta para introdução de combustível	Possível explosão, combustíveis na fornalha
Válvula(s) de recirculação do coletor de LP aberta(s)	Válvula(s) de LP aberta(s) na preparação para purga do coletor de licor	
Comprovar nível do tanque de dissolução satisfatório	Evitar acúmulo de smelt não dissolvido no tanque de dissolução	Possível explosão no tanque de dissolução
Comprovar Sistema de refrigeração das bicas de smelt satisfatório	Garantir boa refrigeração das bicas antes da queima de licor	Possível perda da bica e fluxo de smelt na fornalha descontrolado
Interruptor do sistema de lavagem hidráulica de LP fechado	Garantir que o sistema de lavagem está inativo durante a queima de LP	Evitar baixa concentração de sólidos no LP e entrada de licor de lavagem na fornalha
Concentração de sólidos no LP > 58%	Estabelecer nível de sólidos no LP para queima segura	Introdução possível de concentração baixa de sólidos na fornalha
Temperatura do LP não ser baixa	Garantir boas características de pulverização	Acúmulo de LP não queimado na fornalha
Água não operacional conhecida e fontes de licor fraco isoladas incluindo água de lavagem sootblower	Evitar diluição do LP	Possível introdução de licor com baixa concentração de sólidos ou água na fornalha
Número suficiente de queimadores de combustível auxiliar na fornalha em serviço	Garantir temperatura adequada na fornalha para ignição e queima de LP	Acúmulo de LP não queimado na fornalha
Válvula do coletor de LP aberta e a de Desvio fechada	Permite a circulação de LP pelos coletores de LP	
Fluxo mínimo de LP estabelecido em 25% da taxa	Garantir fluxo mínimo de LP para purga do coletor de LP	
Pressão do LP não ser baixa	Garantir boas características de pulverização	Acúmulo de LP não queimado na fornalha
Crédito de purga estabelecido pela purga mínima de 2 minutos no coletor de LP	Purgar o coletor de LP de possível LP com baixa concentração (veja capítulo 15)	Introdução de LP com baixa concentração de sólidos na fornalha
Purga completa do coletor de LP	Todos os interlocks satisfeitos. Pronto para queimar LP	
Confirmação manual de concentração de LP > 58%	Checar os sólidos no LP para confirmar nível de sólidos > 58%	Possível introdução de licor com baixa concentração de sólidos na fornalha
Soprar condensado no queimador de LP para fora da fornalha	Remover condensado do queimador de LP e linhas	Possível introdução de LP com baixa concentração de sólidos na fornalha
Inserir o primeiro queimador de LP na fornalha	Queimar LP	
Abrir válvula do queimador de LP	Queimar LP	
Estabelecida queima de LP	Observar a ignição do LP	Acúmulo de LP não queimado na fornalha, queima instável
Inserção de sucessivos queimadores de LP após aprovação das partes internas	Aumento de carga de forma ordenada, mantendo ignição estável, nível do balão, produção de vapor e fluxo de smelt nas bicas.	Acúmulo de LP não queimado na fornalha, queima instável

O diagrama da lógica de parada admissível comum para queima de licor preto pode ser visto diretamente no manual, e a explicação e comentários de cada sua etapa consta aqui na tabela V. A figura 10 ilustra, a partir de uma caldeira em operação, um exemplo de implementação do diagrama da lógica de partida de queima de licor preto.

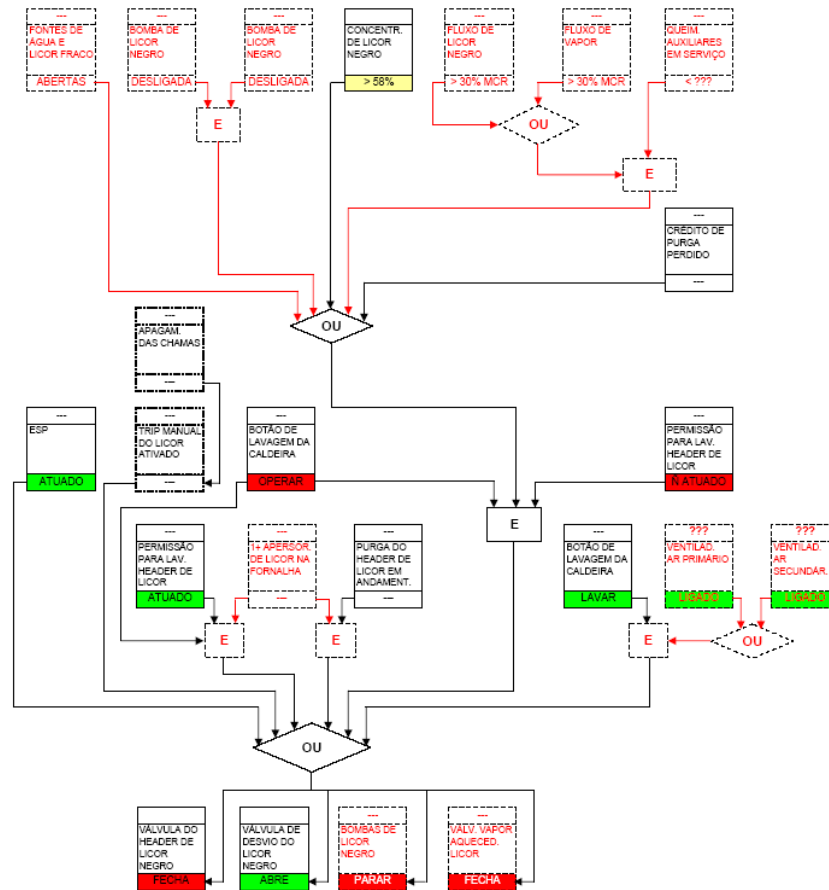


Figura 10 – Ilustração de exemplo de implementação do diagrama da lógica de procedimento de parada de proteção comum<sup>[15]</sup> para queima de licor preto em uma fábrica.

TABELA V – Procedimento de Parada de Proteção Comum<sup>[16]</sup> para queima de licor preto.

Diagrama Blocos da Lógica	Propósito	Protegido contra Perigo
Temperatura alta DCE	Parada IDF(s), ventiladores de tiragem forçada e todos os combustíveis devem estar com 90°C acima da temp. de projeto à capacidade nominal.	Fogo em contato direto com o sistema de evaporação
Temperatura alta na saída do Precipitador	Parada IDF(s), ventiladores de tiragem forçada e todos os combustíveis devem estar com 90°C acima da temp. de projeto à capacidade nominal.	Fogo no precipitador em contato direto com o sistema de evaporação
Fluxo de ar abaixo nível dos bocais menor que 30% FCM	Cortar todos os combustíveis se o fluxo de ar abaixo dos bocais cair para menos de 30% do FCM de ar para o LP	Possível explosão devido a mistura combustível-ar imprópria
Oxigênio ou combustível Insuficiente	Parar IDF(s), ventiladores de tiragem forçada e todo combustível	Possível dano estrutural devido a implosão
	Cortar todo o comb. da fornalha devido	

Sistema de gerenciamento de queimadores deserneziado	a blecaute na energia dos circuitos de controle de gerenciamento dos queimadores	Possível explosão durante queima em condições não supervisionadas
Trip manual do combustível principal	Cortar queima total de combustível	
Perda ou trip do último IDF	Desligar ventilador tiragem forçada e todos os combustíveis	Pressurização da fornalha cria condições inseguras para queima, perigo de incêndio para trabalhadores e equip.
Nível insuficiente de água no balão de vapor	Cortar queima total de comb. Quando o nível de água for insuficiente	Danos às partes sob pressão quando da queima com nível de água insuficiente
Fluxo de LP para fornalha < 30% Fluxo Contínuo Máximo (FCM)	Remover certificação de purga para queima de LP	Possível explosão devido a queima dos gases
Fluxo de vapor para fornalha < 30% Fluxo Contínuo Máximo (FCM)	Remover certificação de purga para queima de LP	Possível explosão devido a queima dos gases
Pressão alta na fornalha	Desligar todos os vent. tiragem forçada e cortar todo comb. caso exista condição instável ou perigosa ou se ocorrer uma explosão	Pressurização da fornalha cria condições inseguras para queima, perigo de incêndio para trabalhadores e equip.
Drenagem rápida da caldeira atuado	Fechar todo comb. da fornalha durante a drenagem rápida	
Queimadores auxiliares fora de serviço	Fazer purga da fornalha antes da ignição após o apagamento da chama	Possível explosão devido a pirólise dos gases
Trip em todos os ventiladores de tiragem forçada	Desligar ventiladores tiragem forçada com a parada dos IDF(s) ou pressão alta na fornalha	Prevenir possível dano estrutural
Perda de qualquer ventilador de tiragem forçada abaixo dos bocais de licor	Cortar todo comb. caso qualquer vent. de tiragem forçada abaixo dos queimadores de licor pare	Possível explosão devido ao acúmulo de misturas explosivas
Perda total de chama	Parar queima total de comb.	Possível explosão de comb.não queimado
Trip do comb. principal devido a falta de certificação de purga	Cortar todo combustível da fornalha	Queima de combustível com condição de queima insegura na fornalha
Isolamento de fluxos de NCG residual	Parar introdução de NCG na fornalha	Possível explosão

A leitura atenta desta tabela V ilustra bem a lógica destes diagramas, mas sempre é melhor observar também a implementação lógica destes procedimentos. Por isso ilustra-se aqui, nas figuras 11 e 12, estas configurações a partir do trabalho de Edison Strugo Muniz.

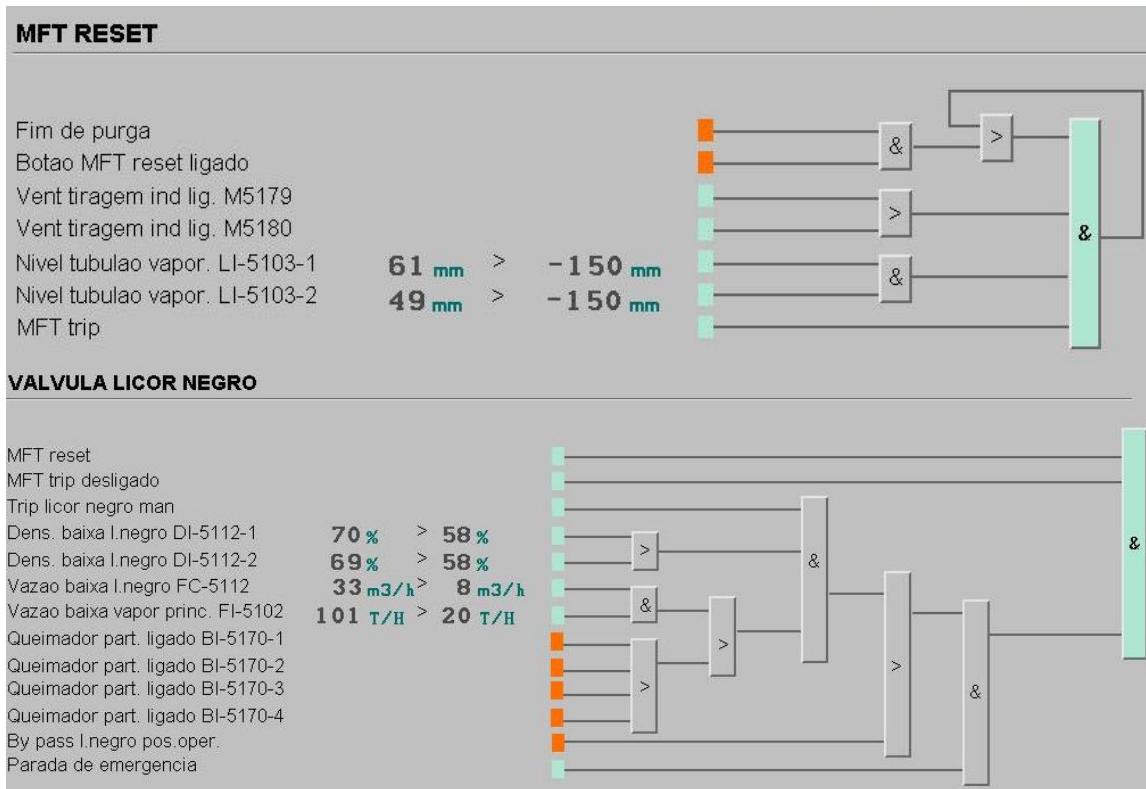


Figura 11 – Implementação lógica do procedimento de partida <sup>[14]</sup>.

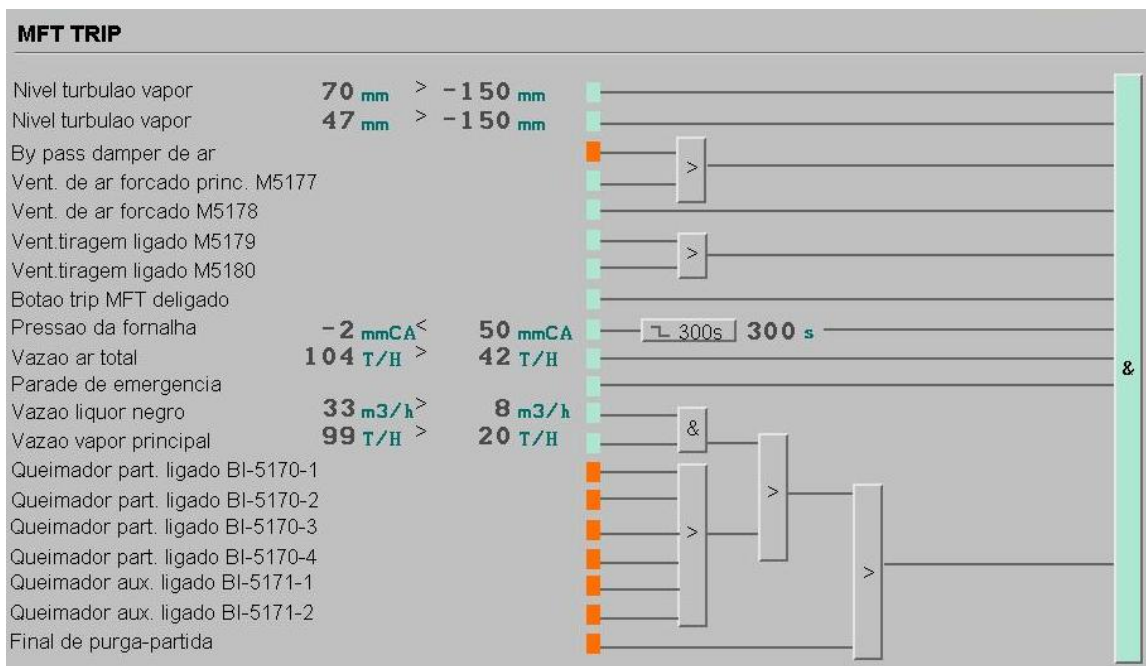


Figura 12 – Implementação lógica do procedimento de partida <sup>[14]</sup>.

## Otimização da Evaporação e Caldeira de Recuperação

Nem só de segurança e parada de emergência trata a área de automação de caldeira. Além de aquisição de informação da unidade e monitoramento, outra área é o uso de automação

para otimização de processos. Edison Strugo Muniz apresenta a sua experiência de instalação de sistema comercial de controle da caldeira de recuperação.

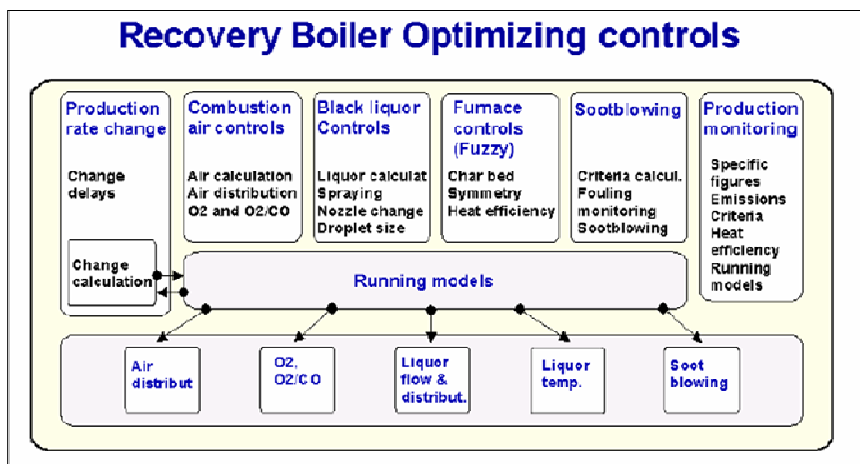


Figura 13 – Sistema de controle moderno da caldeira de recuperação química [17].

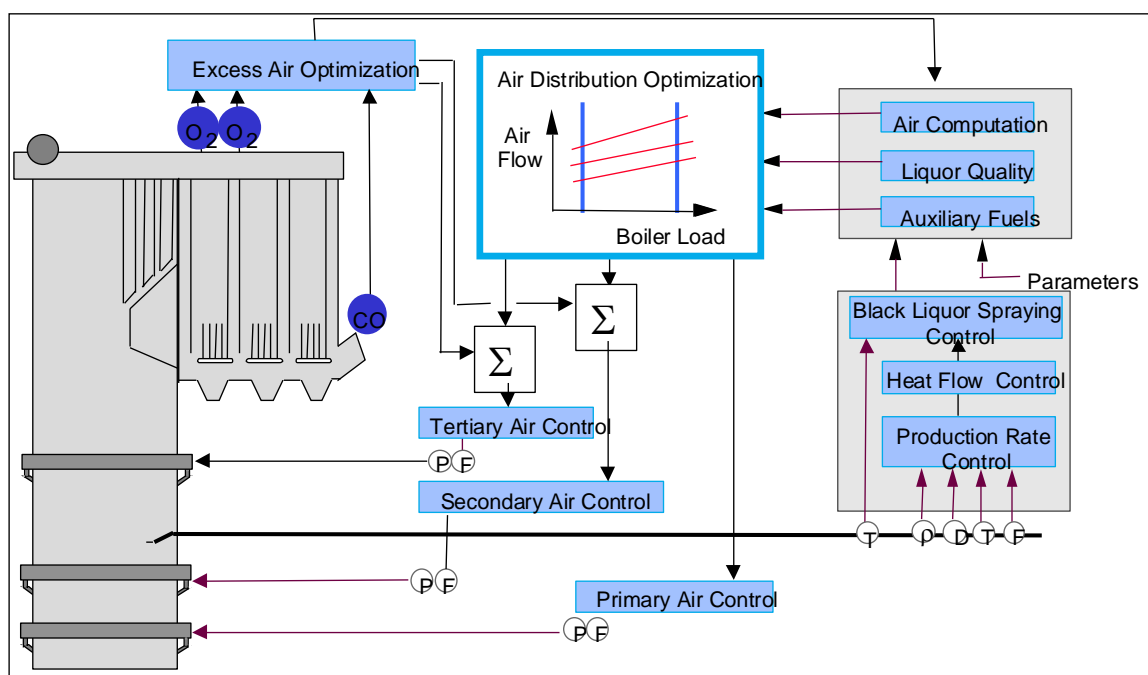


Figura 14 – Sistema de controle moderno de ar de combustão na caldeira de recuperação química [17].



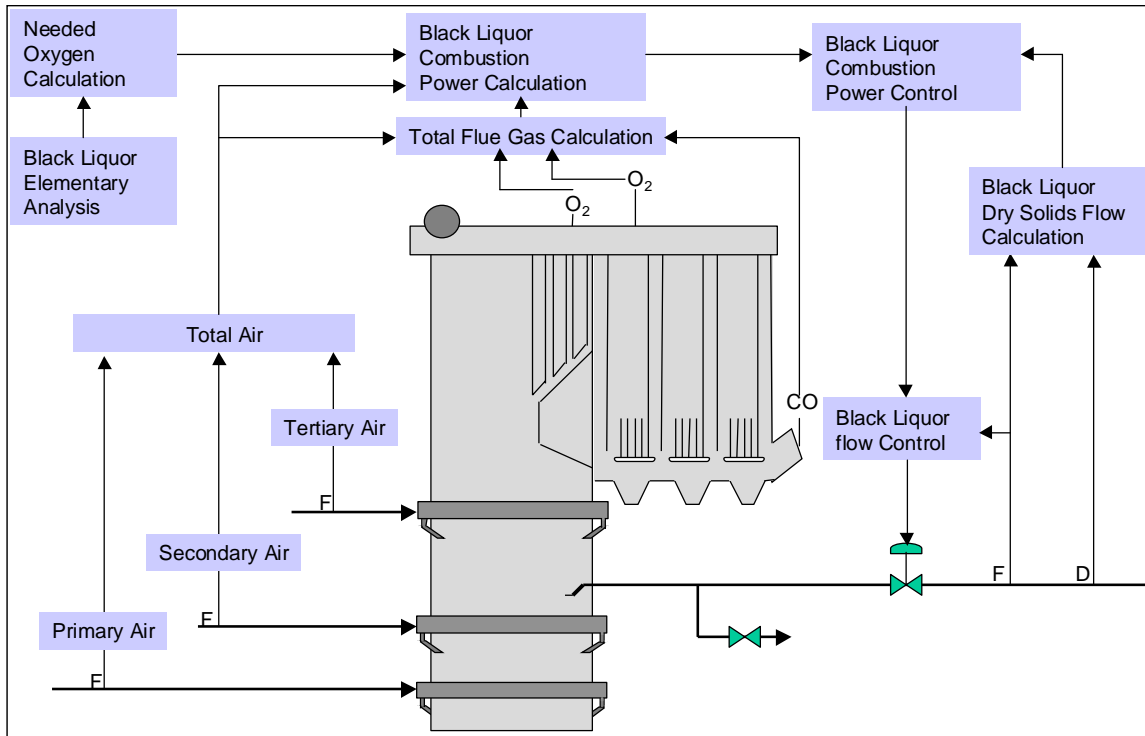


Figura 15 – Sistema de controle moderno de queima de licor preto na caldeira de recuperação química [17].

### Sootblowing Optimization

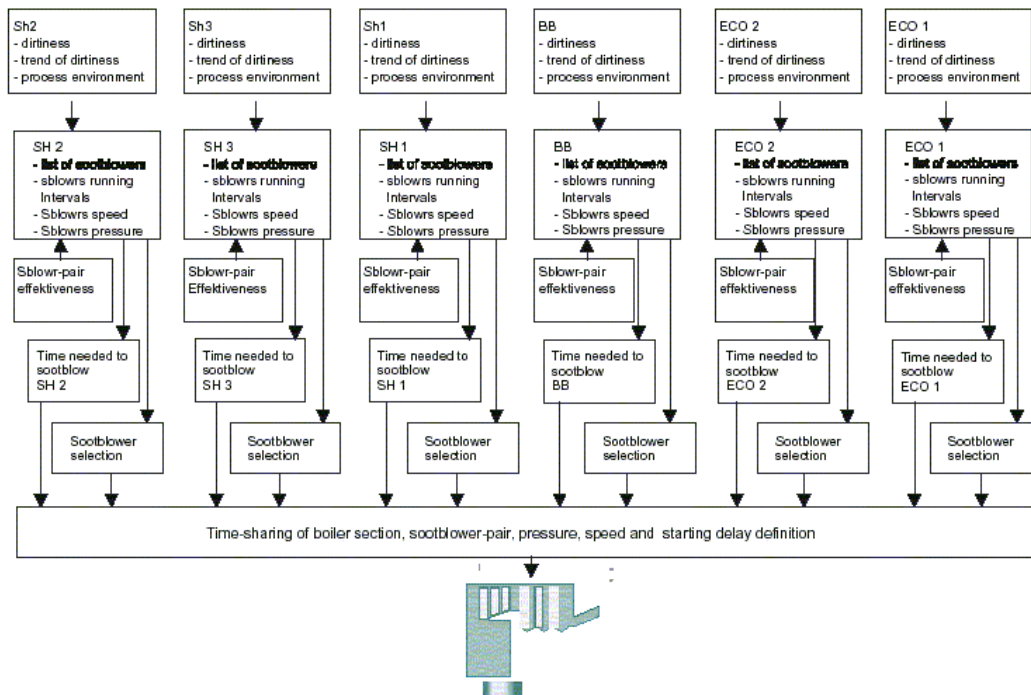


Figura 16 – Sistema de controle moderno de sopragem de cinzas na caldeira de recuperação química [17].

Segundo Edison Strugo Muniz <sup>[17]</sup>, com estes sistemas de controle conseguiu aumento de 1-3% de eficiência, com correspondente 30% de redução em desvio-padrão, 10% de redução de nível de oxigênio, com correspondente 30% de redução em desvio-padrão, redução de 10-20% de emissão e aumento de 1-5% de sólidos secos devido a controle da área de evaporadores e correspondente 1-5% aumento de produção de vapor. A figura 17 mostra os ganhos estimados com o controle moderno nesta unidade fabril.

### Aumento da Produção

<b>Referência</b> 32,07 t ds/h	<b>Garantia %</b> + 2,1 %	<b>Atual</b> 32,92 t ds/h	<b>Ganho real %</b> + 2,65 %
-----------------------------------	------------------------------	------------------------------	---------------------------------

### Geração de Vapor

<b>Referência</b> 95,0 t/h	<b>Garantia %</b> + 5,0 %	<b>Atual</b> 105,88 t/h	<b>Ganho real %</b> + 11,45 %
-------------------------------	------------------------------	----------------------------	----------------------------------

### Consumo no Vapor de Sopragem

<b>Referência</b> 7,21 t/h	<b>Garantia %</b> - 7,0 %	<b>Atual</b> 6,61 t/h	<b>Ganho real %</b> - 8,32 %
-------------------------------	------------------------------	--------------------------	---------------------------------

Figura 17 – Ganhos estimados <sup>[17]</sup> devido a controle moderno na caldeira de recuperação química.

## Futuros trabalhos

A automação das caldeiras de recuperação possuem discrepâncias entre os fornecedores Americanos e Escandinavos no seu sistema lógico. Por isso foi realizado um trabalho em conjunto, de comissões de Automação e de Recuperação, para analisar as lógicas e sistemas de segurança a fim de ter uma equalização e possível recomendação para os usuários/fornecedores.

Entre outubro a dezembro de 2005 foram realizadas visitas técnicas a Aracruz (Barra do Riacho), Klabin (Correa Pinto e Otacílio Costa), Aracruz (Guaiba), Veracel, Bahia Sul, Cenibra e Klabin (Telêmaco Borba). Ainda serão visitadas Ripasa, VCP, Suzano e Lwarcel. Os resultados das visitas, diagramas SAMA, detalhes de avaliação de seguradoras, relatórios internos de avaliação, interfaces e PIMS (informações da unidade fabril) são coletados e avaliados para descrever os pontos comuns e pontos relevantes destes procedimentos de segurança. Detalhes de cada fábrica é totalmente resguardada em caráter de sigilo, e este presente trabalho conta com apoio de ABTCP e por intermédio desta associação, obteve-se formalmente apoio dos diretores de cada unidade fabril. De ponto de vista tecnológico, o resultado desta coleta, análise e comparação de informações será consolidada e apresentada ao setor de celulose e papel até fim de 2007.

Finalmente, não seria possível analisa e compilar dados sem uma base de conhecimento sólido. Na Universidade faz-se paralelamente estudos de diagnóstico de falhas de operação<sup>[18]</sup>, controle inteligente de caldeiras<sup>[19]</sup>, e modelagem fluidodinâmica<sup>[20]</sup> entre outros, para fornecer suporte a estes estudos tecnológicos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Afonso Moraes de Moura, Floreal Puig, Humberto L.A. Batista, Daniel Sidoruk, Ari S. Medeiros, Geraldo Simão, Sandro Morais Santos, Marcos Antonio Betini, Márcio L.D. Mendes, Roberto A. Villarroel Guerrero, e Isaías Shimura.

## Referências Bibliográficas

1. Vakkilainen, E.K. Modern recovery practices and state-of-the-art technology. International Chemical Recovery Conference. Quebec, Canadá. May 29-June 1, 2007
2. Tran, H.; Vakkilainen, E.K. Advances in the Kraft chemical recovery process. 3º ICEP. MG. Brazil mar 4-7, 2007
3. D'Almeida, M.L.O. (ed.) *Celulose e Papel*. 2ª edição. IPT e Senai. São Paulo. 1988.
4. Pereira, A. Relatório do Sub-Comitê de Parada de Emergência 2006. CSCRB - Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil. ABTCP São Paulo 2006.
5. Alves, A.S. Reparo em partes sob pressão em caldeiras de recuperação química em fábrica de polpa celulósica. Monografia de Especialista em Papel e Celulose, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Brasil. 2004
6. Paoliello, F.A.; Alves, A.C.; Maestri, E.; Felicíssimo Neto, J.; Aspgren, L.P. Guia de Inspeção de Caldeiras de Recuperação. CSCRB - Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil. ABTCP São Paulo 2002.
7. Medeiros, A.; Villarroel Guerrero, R.A.; Betini, M.A.; Mendes, M.L.D.; Domancich, N.V. Práticas recomendadas para oxidação térmica de gases não-condensáveis em caldeiras de recuperação. CSCRB - Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil. ABTCP São Paulo 2002.
8. Medeiros, A.; Villarroel Guerrero, R.A.; Betini, M.A.; Mendes, M.L.D.; Domancich, N.V. Lista de checagem de instrumentação e guia de classificação para instrumentos e sistemas de controle usados na operação de caldeiras de recuperação. CSCRB - Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil. ABTCP São Paulo 2002.
9. Gommi, J. Status of leak detection methods for recovery units in North America. Tappi Journal. Vol. 81, num. 10, pp.69-75. Oct. 1998.
10. Keiser, J.R.; Sarma, G.B.; Wang, X.L.; Camden, R.H.; Swindeman, R.W.; Maziasz, P.J.; Singbell, D.L.; Singh, P.M. Why do kraft recovery boiler composite floor tubes crack? Tappi Journal. Vol. 84, num. 8, 10p. Aug. 2001.
11. Grace, M. T.; Tran, H. Char bed cooling – significance of recent incidents. International Chemical Recovery Conference. Quebec, Canadá. May 29-June 1, 2007
12. Tacla, C. Caldeiras de recuperação. Notas de aula Curso de Especialização em Papel e Celulose. Escola Politécnica 2002.

13. Ribeiro, R. Automação e segurança em caldeiras de recuperação química. ABTCP-Tappi 2003. Congresso Anual Brasileiro em Celulose e Papel. São Paulo 2003.
14. Muniz, E.S. Conceitos de Segurança em Caldeira de Recuperação. Seminário de encontro de operadores de caldeira de recuperação ABTCP 2005. Octacílio Costa Klabin-SC 09 de Outubro de 2005.
15. Ribeiro, R.; Muniz, E.S.; Lamarque, L.H.F.; Mehta, R.K.; Park, S.W. Sistema de Queima de Licor Preto e Paradas de Emergência. Seminário de Automação ABTCP. São Paulo 2005
16. Ribeiro, R. Comitê Interno Consultivo de Cenibra para Caldeira de Recuperação de Licor Preto. Práticas recomendadas de queima segura de licor em caldeiras de recuperação. Cenibra Ipatinga MG 2004.
17. Hoss, C.P.; Muniz, E.S.; Puhakka, J.; Onofre, R.C. Resultados da Otimização da Evaporação e Caldeira de Recuperação da Klabin CP. 7º Congresso Latino Americano de Caldeiras de Recuperação. Porto Seguro. BA. 28-31 de agosto 2007
18. Almeida, G.M. Detecção de situações anormais em caldeiras de recuperação química. Tese de Doutorado. Escola Politécnica. USP. São Paulo. 2006.
19. Herrera Sosa, I.R. Sistemas multiagentes para controle inteligente da caldeira de recuperação. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica. USP. São Paulo. 2007.
20. Ferreira, D.J.O. Análise de uma caldeira de recuperação química via fluidodinâmica computacional. Dissertação de Mestrado. UFMG. Belo Horizonte. 2008 (em andamento)