



# **Confiabilidade de Pontos Críticos de Controle: Estudo de Caso em uma Indústria de Massas Frescas**

Diego José Trica

## **Projeto de Final de Curso**

Orientadores

Prof<sup>a</sup> Karen Signori Pereira, D.Sc.  
Maya Orneles Sato, Eng<sup>a</sup>  
João Alfredo Mothé, Quim

Dezembro de 2011

# CONFIABILIDADE DE PONTOS CRÍTICOS DE CONTROLE: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE MASSAS FRESCAS

*Diego José Trica*

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro de Alimentos.

Aprovado por:

---

Prof<sup>a</sup>. Elisabete B. de Paula Barros, D. Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Luciana Maria Romero Éesper, D.Sc.

Orientado por:

---

Prof<sup>a</sup>. Karen Signori Pereira, D.Sc.

---

Maya Orneles Sato, Eng<sup>a</sup>

---

João Alfredo Mothé, Quim

Rio de Janeiro, RJ-Brasil

Dezembro de 2011

TRICA, Diego José.

Confiabilidade de pontos críticos de controle: Estudo de caso em uma indústria de massas frescas / Diego José Trica. Rio de Janeiro: UFRJ / EQ, 2011.

xv, 122 p.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2011.

Orientadores: Prof<sup>a</sup> Karen Signori Pereira, Maya Orneles Sato e João Alfredo Mothé

1. Segurança dos Alimentos. 2. Confiabilidade. 3. Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle. 4. Projeto Final (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Prof<sup>a</sup> Karen Signori Pereira. I. Título.

*À minha família: José Carlos (Pai), Marilene (Mãe), Thiago (Irmão), Frederico  
(Irmão) e Bob (Irmão).*

*A “Queen of the bees”*

*Às minhas mestras: Prof<sup>a</sup>. Karen e Prof<sup>a</sup>. Ana Lúcia.*

*Ao futuro da Engenharia de Alimentos.*

*“Qual o meio prático mais eficaz que o homem tem de se melhorar nesta vida e de resistir à atração do mal?”*

*“Um sábio da antiguidade vo-lo disse: Conhece-te a ti mesmo”*

*“Conhecemos toda a sabedoria desta máxima, porém a dificuldade está precisamente em cada um conhecer-se a si mesmo. Qual o meio de consegui-lo?”*

*“Fazei o que eu fazia, quando vivi na Terra: ao fim do dia, interrogava a minha consciência, passava revista ao que fizera e perguntava a mim mesmo se não faltara a algum dever, se ninguém tivera motivo para de mim se queixar. Foi assim que cheguei a me conhecer e a ver o que em mim precisava de reforma. Aquele que, todas as noites, evocasse todas as ações que praticara durante o dia e inquiresse de si mesmo o bem ou o mal que houvera feito, rogando a Deus e ao seu anjo de guarda que o esclarecessem, grande força adquiriria para se aperfeiçoar, porque, crede-me, Deus o assistiria. Dirigi, pois, a vós mesmos perguntas, interrogai-vos sobre o que tendes feito e com que objetivo procedestes em tal ou tal circunstância, sobre se fizeste alguma coisa que, feita por outrem, censuraríeis, sobre se obrastes alguma ação que não ousaríeis confessar. Perguntai ainda mais: ‘Se aprovesse a Deus chamar-me neste momento, teria que temer o olhar de alguém, ao entrar de novo no mundo dos espíritos, onde nada pode ser ocultado?’*

*“Examinai o que pudestes ter obrado contra Deus, depois contra o vosso próximo e, finalmente, contra vós mesmos. As respostas vos darão, ou o descanso para a vossa consciência, ou a indicação de um mal que precise ser curado.”*

*“O conhecimento de si mesmo é, portanto, a chave do progresso individual. Mas, direis, como há de alguém julgar-se a si mesmo? Não está aí a ilusão do amor-próprio para atenuar as faltas e torná-las desculpáveis? O avaro se considera apenas econômico e previdente; o orgulhoso julga que em si só há dignidade. Isto é muito real, mas tendes um meio de verificação que não pode iludir-vos. Quando estiverdes indecisos sobre o valor de uma de vossas ações, inquiri como a qualificaríeis, se praticada por outra pessoa. Se a censurais noutrem, não na podereis ter por legítima quando fordes o seu autor, pois que Deus não usa de duas medidas na aplicação de sua justiça. Procurai também saber o que dela pensam os vossos semelhantes e não desprezeis a opinião dos vossos inimigos, porquanto esses nenhum interesse têm em mascarar a verdade e Deus muitas vezes os coloca ao vosso lado como um espelho, a fim de que sejais advertidos com mais franqueza do que faria um amigo. Perscrute, conseqüentemente, a sua consciência aquele que se sinta possuído do desejo sério de melhorar-se, a fim de extirpar de si os maus pendores, como do seu jardim arranca as ervas daninhas; dê balanço no seu dia moral para, a exemplo do comerciante, avaliar suas perdas e seus lucros e eu vos asseguro que a conta destes será mais avultada que a daquelas. Se puder dizer que foi bom o seu dia, poderá dormir em paz e aguardar sem receio o despertar na outra vida.”*

*“Formulai, pois, de vós para convosco, questões nítidas e precisas e não temais multiplicá-las. Justo é que se gastem alguns minutos para conquistar uma felicidade eterna. Não trabalhai todos os dias com o fito de juntar haveres que vos garantam repouso na velhice? Não constitui esse repouso o objeto de todos os vossos desejos, o fim que vos faz suportar fadigas e privações temporárias? Pois bem! Que é esse descanso de alguns dias, turbado sempre pelas enfermidades do corpo, em comparação com o que se espera o homem de bem? Não valerá este outro a pena de alguns esforços? Sei haver muitos que dizem ser positivo o presente e incerto o futuro. Ora, esta exatamente a idéia que estamos encarregados de eliminar do vosso íntimo, visto desejarmos fazer que compreendais esse futuro, de modo a não restar nenhuma dúvida em vossa alma. Por isso foi que primeiro chamamos a vossa atenção por meio de fenômenos capazes de ferir-vos os sentidos e que agora vos damos instruções, que cada um de vós se acha encarregado de espalhar. Com este objetivo é que ditamos O Livro dos Espíritos.”*

*Santo Agostinho, psicografado por Allan Kardec. O Livro dos Espíritos, 1857.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, professora Karen, pela dedicação, instrução e crença nos meus ideais profissionais. Graças a ela, ainda acredito no futuro de minha profissão.

Agradeço também ao meu irmão Thiago por ter permitido a comunicação entre a universidade e a indústria, bastante necessária hoje em dia para o desenvolvimento do país e não relevada, além de ter me ajudado e apoiado para elaboração do projeto.

Agradeço especialmente à Maya (Nápoles) e ao Mothé (Nápoles) por terem privado um pouco do tempo de trabalho que tinham para me ouvir e me orientar. Este trabalho também possui parte de suas autorias.

Agradeço também à minha família e aos meus amigos, estando sempre ao meu lado, me apoiando e ouvindo, mesmo durante meus resmungos infundáveis e momentos de grosseria.

Agradeço especialmente aos meus grandes colegas profissionais da DNV que me ajudaram a elaborar este trabalho: Guilherme, Tadeu e Bruno. Posso deixar apenas a mensagem de saudades da DNV e sua equipe.

Por último, agradeço à banca julgadora pela disponibilidade e interesse neste trabalho.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro de Alimentos.

## **CONFIABILIDADE DE PONTOS CRÍTICOS DE CONTROLE: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE MASSAS FRESCAS**

*Diego José Trica*

Dezembro, 2011

Orientadores: Prof<sup>a</sup>. Karen Signori Pereira, D.Sc.  
Maya Orneles Sato, Eng<sup>a</sup>  
João Alfredo Mothé, Quim

As plantas processadoras de alimentos, em sua maioria, não contemplam em seus estudos de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) possibilidades de ocorrerem falhas na detecção de um desvio excedendo o(s) limite(s) crítico(s). Sendo assim, mesmo que uma medida de controle tenha sido dimensionada corretamente, se a detecção de um desvio não for eficiente e/ou confiável, então, em caso de falha de um PCC, o alimento poderia estar contaminado, sem que tenha sido detectada a falha do PCC. Com isso, os conceitos de confiabilidade e de probabilidade de falha podem ser utilizados como uma ferramenta útil para avaliação deste problema.

O objetivo deste trabalho foi apresentar a técnica e os conceitos de confiabilidade como uma ferramenta para ser utilizada em um sistema de gestão de segurança dos alimentos. A apresentação desta técnica foi feita realizando-se um estudo de caso de um processo de produção de massas frescas da indústria Massas Nápoles LTDA. Devido à ausência de um plano HACCP elaborado pela Nápoles, uma análise prévia de perigos potenciais foi realizada para classificar algumas etapas do processo analisado na Nápoles como PCCs.

O estudo de confiabilidade do PCC-03-02 (processo de pasteurização) teve como resultado que este PCC possui uma confiabilidade muito baixa, sendo o valor encontrado do “tempo médio para falha” (MTTF) dado por 6,64 anos. Com isso, foi realizado um estudo de melhoria da confiabilidade deste processo.

Foram recomendadas modificações nas malhas de controle do PCC-03-02 (nível de água de processo na caldeira elétrica e temperatura interna do pasteurizador) dadas pela utilização de configurações redundantes dos componentes das duas malhas, o que resultou em um aumento na confiabilidade do processo do PCC como um todo, onde o MTTF obtido foi de 8,66 anos. A recomendação para a malha de controle da temperatura interna do pasteurizador, responsável pela detecção de desvios do limite crítico, foi instalar uma configuração em redundância ativa 1/3 de transmissores de temperatura, tendo a malha uma confiabilidade de 99%.

Este trabalho pode ser utilizado como uma referência, tanto em pesquisa quanto em campo, para que futuros trabalhos sejam capazes de abordar com clareza e detalhamento novos estudos de confiabilidade de PCCs. A realização de estudos mais detalhados agregaria mais conhecimentos à engenharia de alimentos, possibilitando a aplicação de estratégias e técnicas de engenharia para a produção de alimentos mais seguros acoplada a minimização dos respectivos custos.

Final Graduate Project abstract presented to Escola de Química by the requirements to achieve the grade of Food Engineer.

## **RELIABILITY OF CRITICAL CONTROL POINTS: CASE STUDY OF A FRESH PASTA INDUSTRY**

*Diego José Trica*

December, 2011

Advisors: Prof<sup>a</sup>. Karen Signori Pereira, D.Sc.  
Maya Orneles Sato, Eng.  
João Alfredo Mothé, Quim.

The food processing plants, in majority, do not take into account in their studies of Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP) possibilities of occurring fails on the detection of a deviation exceeding the critical limit(s). By the way, even if a control measurement has been designed properly, if the detection of a deviation is not efficient, then, in case of a CCP fail, the food could be contaminated, without being detected the CCP fail. Thus, the concepts of reliability and failure probability can be used as a useful tool for the evaluation of this problem.

The objective of this work was to present the technique and the concepts of reliability as a tool to be used in a food safety management system. The presentation of this technique has been done by performing a case study of a production process in the Massas Nápoles LTD.'s industry. Due to the lack of a HACCP plan developed by Nápoles, a preliminary hazard analysis has been developed to classify as CCPs a few steps of the Nápoles' analysed process.

The CCP-03-02 (pasteurization process) reliability study has resulted in a very low reliability of this CCP, being the value found of the *mean time to failure* (MTTF) given by 6.64 years. Thus, a study to improve the reliability of this process was conducted.

Modifications were recommended in the CCP-03-02 control loops (electrical boiler process water level and pasteurizer internal temperature) given by the use of component's redundant configurations in the two loops, which resulted in an increase of the CCP process reliability as a whole, where the value found of the MTTF was 8.66 years. The recommendation to the pasteurizer internal temperature control loop, responsible for detecting deviations from the critical limits, was given by the installation of temperature transmitters in a 1/3 active redundant configuration, having the loop a reliability of 99%.

This work can be used as a reference, both in research and in the field, for future studies being able to subject with easy and detail new reliability studies of the CCPs. The development of more detailed studies could provide more knowledge for food engineering, becoming possible the application of engineering strategies and techniques on the production of high level safety food coupled with the respective costs minimization.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
I.1 Objetivos e motivação	4
I.2 Estrutura do trabalho	5
<b>CAPÍTULO II. CONFIABILIDADE E TAXA DE FALHA</b>	<b>6</b>
II.1 Introdução	6
II.1.1 Definições básicas	7
II.2 Modelagem da taxa de falha	11
II.2.1 Taxa de falha constante	12
II.2.2 Probabilidade de falha na demanda	14
II.2.3 Taxa de falha total	16
II.3 Confiabilidade de sistemas ou componentes interligados	18
II.3.1 Redundância de componentes	19
II.3.2 Componentes em paralelo: Redundância ativa	22
II.3.3 Limitações da redundância de componentes	24
II.3.4 Redundâncias múltiplas	27
<b>CAPÍTULO III. DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO</b>	<b>34</b>
III.1 Histórico	34
III.2 Linha de produtos	35
III.3 Sistema de gestão da segurança dos alimentos	35
III.3.1 Plano HACCP	37
III.3.2 Departamento de Vendas e Expedição	38
III.4 Instalações e edificações	38
III.5 Processo de produção de ravióli, capelete, pastel recheado, fagotini e nhoque	39
III.5.1 Processo 01: Recebimento e Estocagem de Matérias-primas e Insumos	40
III.5.2 Processo 03: Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque	42
III.5.3 Processo 07: Acondicionamento em Frigorífico e Expedição	47
III.5.4 Processo 08: Preparo dos Recheios	49

III.5.5 Processo 09: Farinha de Rosca	53
III.5.6 Processo 10: Água de Processo	55
<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISE PRÉVIA DOS PERIGOS</b>	<b>57</b>
IV.1 Perigos físicos	57
IV.1.1 Barreiras existentes contra perigos físicos	58
IV.2 Perigos químicos	59
IV.2.1 Barreiras existentes contra perigos químicos	59
IV.3 Perigos biológicos	61
IV.3.1 Barreiras existentes contra perigos biológicos	64
IV.4 Seleção dos PCCs	70
<b>CAPÍTULO V. CONFIABILIDADE DOS PCCs</b>	<b>72</b>
V.1 Descrição do processo do PCC-03-02	74
V.2 Confiabilidade do PCC-03-02	77
V.2.1 Considerações e premissas iniciais	78
V.2.2 Resultados da avaliação da confiabilidade do PCC-03-02	82
V.3 Melhoria da confiabilidade do PCC-03-02	87
V.3.1 Malha de controle do nível da água na caldeira elétrica	89
V.3.2 Malha de controle da temperatura interna do pasteurizador	98
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>111</b>
VI.1 Melhoria da confiabilidade do PCC-03-02	111
VI.2 Probabilidade de falha perigosa	116
VI.3 Manutenção preventiva e testes de desempenho	118
VI.4 Possíveis estudos dos demais PCCs	119
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>121</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil característico do comportamento da taxa de falha com o tempo. Adaptado de [7].	11
Figura 2 – Comportamento de $R(t)$ e $F(t)$ de um componente em função de $\lambda_0(t)$ . Adaptado de [7].	13
Figura 3 – Comportamento de $f(t)$ de um componente em função de $\lambda_0(t)$ . Adaptado de [7].	14
Figura 4 – Redução da confiabilidade de um sistema com $N$ componentes integrantes. Adaptado de [7].	20
Figura 5 – Representação em diagrama de blocos dos componentes de um sistema. a) Componentes em série. b) Componentes em paralelo. Adaptado de [7].	21
Figura 6 – Comparação entre $R(t)$ de um único componente e de dois componentes em paralelo. Adaptado de [7].	23
Figura 7 – Comparação entre $\lambda(t)$ de um único componente e de dois componentes em paralelo. Adaptado de [7].	23
Figura 8 – Dependência da confiabilidade de um sistema em redundância ativa $1/N$ com a confiabilidade dos componentes. Adaptado de [7].	28
Figura 9 – Efeito do fator $\beta$ na confiabilidade de sistemas em redundância ativa $1/N$ para $\lambda_{IND}t = 1$ . Adaptado de [7].	31
Figura 10 – Efeito do fator $\beta$ na confiabilidade de sistemas em redundância ativa $1/N$ para $\lambda_{IND}t = 0,5$ . Adaptado de [7].	32
Figura 11 – Diagrama de blocos representando um sistema de redundância ativa $2/3$ . Adaptado de [7].	33
Figura 12 – Fluxograma do Recebimento e Estocagem de Matérias-primas e Insumos.	40
Figura 13 – Fluxograma da produção de Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque.	42
Figura 14 – Fluxograma do Acondicionamento em Frigorífico e Expedição.	47
Figura 15 – Fluxograma do Preparo dos Recheios.	49
Figura 16 – Fluxograma da produção de Farinha de Rosca.	53

Figura 17 – Fluxograma da produção de Água de Processo.	55
Figura 18 – Fluxograma P&ID do processo do PCC-03-02, processo de pasteurização.	76
Figura 19 – Diagrama de blocos da malha de controle do nível de água na caldeira elétrica.	77
Figura 20 – Diagrama de blocos da malha de controle da temperatura interna do pasteurizador.	77
Figura 21 – Confiabilidade do PCC-03-02 em função do tempo.	82
Figura 22 – Confiabilidade do transmissor de temperatura em função do tempo.	85
Figura 23 – Evolução da fração de importância da probabilidade de falha dos componentes do PCC-03-02 com o tempo.	86
Figura 24 – Confiabilidade da malha de controle do nível da caldeira em função do tempo.	89
Figura 25 – Efeito dos subsistemas de N transmissores de nível em paralelo na confiabilidade da malha de controle do nível da caldeira.	91
Figura 26 – Aumento da confiabilidade da malha de controle do nível da caldeira com a substituição dos componentes por subsistemas em redundância ativa 1/N.	92
Figura 27 – Redução da confiabilidade de configurações em redundância ativa 1/N devido ao efeito dos eventos de falha em comum.	94
Figura 28 – Confiabilidade da malha de controle do nível na caldeira para a configuração original e a configuração recomendada pelo estudo.	95
Figura 29 – Fluxograma P&ID da configuração recomendada para a malha de controle do nível de água de processo na caldeira.	97
Figura 30 – Efeito dos subsistemas de N transmissores de temperatura em paralelo na confiabilidade da medição da temperatura interna do pasteurizador.	101
Figura 31 – Redução da confiabilidade da medição da temperatura interna do pasteurizador devido ao efeito de eventos de falha em comum.	102
Figura 32–Confiabilidade da malha de controle do nível da caldeira em função do tempo, com a introdução de redundância ativa 1/3 para o TSL e TSH.	106
Figura 33 – Aumento da confiabilidade da malha de controle da temperatura interna do pasteurizador devido à introdução de redundância ativa 1/4 para os resistores elétricos.	107

Figura 34 – Confiabilidade da malha de controle da temperatura interna do pasteurizador para a configuração original e a configuração recomendada pelo estudo.	108
Figura 35 – Fluxograma P&ID da configuração recomendada para a malha de controle da temperatura interna do pasteurizador.	110
Figura 36 – Confiabilidade da configuração recomendada para o PCC-03-02.	112
Figura 37 – Comparação entre o comportamento da confiabilidade do PCC para a configuração original e recomendada pelo estudo.	113
Figura 38 – Fluxograma P&ID do PCC-03-02 da configuração recomendada (componentes “novos” destacados em linhas tracejadas).	115

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Memorial Descritivo das etapas do Recebimento e Estocagem de Matérias-primas e Insumos.	41
Quadro 2 – Memorial Descritivo da produção de Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque.	43
Quadro 3 – Memorial Descritivo do Acondicionamento em Frigorífico e Expedição.	48
Quadro 4 – Memorial Descritivo do Preparo dos Recheios.	50
Quadro 5 – Memorial Descritivo da produção de Farinha de Rosca.	54
Quadro 6 – Memorial Descritivo da produção de Água de Processo.	56
Quadro 7 – Parâmetros intrínsecos e extrínsecos ao crescimento e funcionamento dos microrganismos nos alimentos. (Referência: [14]).	63
Quadro 8 – Gêneros de bactérias frequentemente encontradas em carnes e aves. Adaptado de [14].	66
Quadro 9 – Etapas selecionadas como PCCs da planta industrial da Nápoles.	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de taxa de falha dos componentes do PCC-03-02. Retirado de [16]. 81



## CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, sistemas de controle de qualidade eram baseados na inspeção de um produto em vários pontos de uma linha de processamento, com a rejeição de qualquer produto que não atendesse aos padrões estabelecidos. Essa abordagem reativa focalizava principalmente a verificação do produto final, o que é atualmente reconhecido como um desperdício de recursos – recursos gastos na produção do alimento, o que significa uma perda financeira<sup>[1]</sup>.

Uma abordagem mais proativa e preventiva em segurança dos alimentos e gerenciamento de qualidade, denominada Garantia da Qualidade, foi desenvolvida durante a década de 1980, baseada nos princípios das Boas Práticas de Fabricação (BPF) Seu objetivo é garantir que a qualidade e a inocuidade sejam mantidas ao longo do processo e, assim, evitar a rejeição do produto e a perda financeira. Os fatores que influenciaram esta abordagem, primeiramente<sup>[1]</sup>:

- Aumento na competição entre empresas;
- Necessidade de acesso a mercados alimentícios nacionais e internacionais;
- Sistemas de gerenciamento da qualidade exigidos pelas redes de comercialização (usualmente supermercados).

Em segundo lugar, novas legislações exigiam sistemas que pudessem manter a qualidade e a inocuidade, bem como provar que a empresa as mantém sobre controle<sup>[1]</sup>.

Como parte da garantia da qualidade e de um sistema de gestão da segurança dos alimentos, as indústrias processadoras de alimentos devem considerar as necessidades de utilização de uma ferramenta denominada Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) ou, do inglês, *Hazard Analysis and Critical Control Points* (HACCP)<sup>[2]</sup>.

O Sistema HACCP é baseado em um sistema de engenharia conhecido como Análise dos Modos e Efeitos de Falha, do inglês FMEA (*Failure, Mode and Effect Analysis*), onde se observa, em cada etapa do processo, aquilo que pode sair errado, juntamente com as prováveis causas e efeitos; a partir daí, estabelecem-se os mecanismos de controle<sup>[3]</sup>. Em termos da Legislação brasileira, de acordo com a Portaria 1.428, Ministério da Saúde, de 1993, APPCC tem por definição “metodologia sistemática de identificação, avaliação e controle de perigos de contaminação dos alimentos”<sup>[4]</sup>.



Um estudo de HACCP fornece as medidas de controle básicas necessárias para compreender os mecanismos de produção de um alimento seguro e a base para a criação de um sistema de controle de produção para a garantia da qualidade. Alimento seguro pode ser definido como um alimento livre de contaminações físicas, químicas e/ou biológicas, que possam ocasionar danos à saúde dos consumidores, quando de sua preparação de acordo com instruções do próprio fabricante<sup>[2],[3],[5]</sup>.

Os benefícios de um sistema de garantia da qualidade adequadamente implantado podem ser descritos por<sup>[1]</sup>:

- **Econômicos:** Maior custo-benefício da “obtenção correta na primeira vez”, redução do material descartado, menos reclamações dos consumidores, melhoria da eficiência de equipamentos e aumento da capacidade de produção;
- **De marketing:** Atendimento consistente às necessidades do consumidor, aumento da confiança do consumidor e das vendas;
- **Internos:** Melhoria da moral dos funcionários, aumento dos níveis de comunicação, funcionários melhor treinados e percepção/comprometimento em relação à qualidade, melhoria do controle gerencial e confiança nas operações;
- **Legais:** Demonstração de diligência, provimento de evidências de comprometimento com a qualidade e capacidade de melhoria contínua.

Um estudo de HACCP consiste, basicamente, na identificação e avaliação dos perigos potenciais e das respectivas medidas de controle em um processo de produção do alimento. Sendo assim, este plano se baseia em uma análise dos perigos potenciais e seus respectivos riscos perante a saúde dos consumidores do alimento. Consequentemente, todos os conceitos sobre risco – critério de tolerabilidade, frequências, severidades, etc. – devem ser contemplados. Todas estas informações obtidas e elaboradas após um estudo de HACCP são organizadas em um documento denominado Plano HACCP<sup>[3],[6]</sup>.

Durante a elaboração de um plano HACCP, são realizadas avaliações qualitativas dos riscos associados aos perigos potenciais e verificam-se quais medidas de controle eliminam ou previnem um determinado perigo. Algumas etapas do processo são classificadas como um Ponto Crítico de Controle (PCC) e outras etapas como Ponto de Controle (PC). A definição de PC pode ser dada como “pontos ou etapas afetando a segurança onde um perigo é controlado, mas seu risco não é reduzido para níveis toleráveis”. Já um PCC, trata-se de “qualquer ponto, etapa ou procedimento no qual se aplicam medidas de controle para manter um perigo



significativo sob controle, com objetivo de eliminar, prevenir ou reduzir os riscos para níveis toleráveis à saúde do consumidor”<sup>[3]</sup>.

Um plano HACCP também possui informações sobre quais ações, preventivas ou corretivas, devem ser tomadas para que não ocorra falha dos PCCs, ou que, em caso de falha, nenhum produto contaminado seja vendido. A falha de um PCC pode ser definida como a detecção de um ou mais desvios, excedendo o(s) limite(s) crítico(s) estabelecido(s), de uma(s) medida(s) de controle, em condições normais de operação, possibilitando a produção de um alimento inseguro. Logo, se uma falha do processo acarretar em um desvio da(s) medida(s) de controle excedendo o(s) limite(s) crítico(s), então não se deve considerar que o PCC falhou<sup>[3],[6]</sup>.

Entretanto, na prática, geralmente um plano HACCP não faz nenhuma menção sobre a possibilidade de ocorrerem falhas na detecção de um desvio excedendo o(s) limite(s) crítico(s). As medidas de controle por si, só são capazes de reduzir ou eliminar os perigos devido à aplicação de condições físico-químicas em que o alimento fica submetido. Sendo assim, mesmo que uma medida de controle tenha sido dimensionada de maneira correta, se os instrumentos de medição ou detecção não forem eficientes e/ou confiáveis, então, em caso de falha de um PCC, o alimento poderia oferecer um risco inaceitável à saúde dos consumidores, isto tudo sem que tenha sido detectada a falha do PCC.

A falha dos instrumentos de medição e detecção associados aos PCCs se mostra, então, como um fator relevante no gerenciamento da garantia da qualidade e da segurança dos alimentos. Os conceitos de confiabilidade e de probabilidade de falha podem então ser utilizados como uma ferramenta útil em um sistema de gestão de segurança dos alimentos, visando garantir uma operação a mais segura possível dos PCCs.



## I.1 Objetivos e motivação

O objetivo deste trabalho foi apresentar a técnica e os conceitos de confiabilidade como uma ferramenta para ser utilizada em um sistema de gestão de segurança dos alimentos, principalmente no gerenciamento da manutenção de equipamentos e instrumentos associados aos PCCs e suas respectivas falhas. A técnica também é útil para validar a eficiência destes equipamentos e instrumentos na realização das respectivas medidas de controle e medição de parâmetros de processo associados. A apresentação desta técnica foi feita realizando-se um estudo de caso do processo de produção de massas frescas da indústria Massas Nápoles LTDA.

A necessidade de um estudo de confiabilidade das etapas críticas resulta do grande impacto sobre os custos e prejuízos decorrentes da perda de confiança da marca pelos consumidores; de *recall* de produtos, multas, entre outras consequências quando se vende produtos contaminados. Uma análise mais detalhada sobre as operações, equipamentos e instrumentos associados aos PCCs pode tornar mais eficiente, mais robusta e mais econômica a realização de medidas de controle responsáveis pela eliminação/redução dos perigos potenciais à segurança dos alimentos e a medição de parâmetros do processo associados.

Entretanto, atualmente, a maioria dos trabalhos de análise de perigos em segurança dos alimentos contempla apenas aspectos qualitativos e não avaliam a importância da eficiência e falha das operações, equipamentos e instrumentos associados aos PCCs. A situação atual em que a metodologia HACCP se encontra não contempla técnicas de confiabilidade na condução de um estudo de análise de perigos. Com isso, uma metodologia consolidada desta ferramenta em segurança dos alimentos ainda não existe, sendo necessários mais estudos e trabalhos. Além disso, é de grande importância e utilidade que a técnica de confiabilidade seja validada, para que seja possível a consolidação de sua aplicação em futuros trabalhos e em campo.



## I.2 Estrutura do trabalho

No [CAPÍTULO I](#), buscou-se introduzir o leitor sobre o cenário atual dos sistemas de gestão de segurança dos alimentos, explicando suas necessidades, fundamentos e limitações quanto uma avaliação da eficiência e confiabilidade dos PCCs.

Uma breve descrição dos conceitos de probabilidade de falha e confiabilidade é apresentada no [CAPÍTULO II](#), ressaltando os motivos do aumento da probabilidade de falha com o decorrer do tempo e possíveis soluções para este problema. Este capítulo tem como função introduzir o leitor aos conceitos utilizados para elaboração deste trabalho.

A descrição do empreendimento da organização Massas Nápoles LTDA. é realizada no [CAPÍTULO III](#). Esta descrição contempla um breve histórico e perfil da empresa, a linha de produtos, o sistema de gestão de segurança de alimentos em vigência e alguns dos processos de produção existentes em sua planta industrial. Esta descrição é fundamental para que seja possível a compreensão das discussões realizadas em toda a extensão do trabalho.

No [CAPÍTULO IV](#), é apresentado um estudo de análise prévia de perigos do processo de produção de ravióli, capelete, pastel recheado, fagotini e nhoque, no qual foram identificados e avaliados os principais perigos relativos à segurança dos alimentos existentes. Também há neste capítulo os resultados deste estudo e quais etapas do processo foram sugeridas para serem classificadas como um PCC. O objetivo deste capítulo foi verificar quais etapas do processo poderiam ser avaliadas no estudo de confiabilidade.

O estudo de confiabilidade desenvolvido para um destes PCCs sugeridos é apresentado no [CAPÍTULO V](#). Buscou-se estudar somente um PCC para que fosse possível avaliar e discutir com maiores detalhes as dificuldades e soluções encontradas no estudo.

No [CAPÍTULO VI](#), as conclusões do estudo são apresentadas, resumindo os resultados obtidos e são sugeridas algumas recomendações para a organização Massas Nápoles LTDA. aumentar a confiabilidade do PCC avaliado. Há também neste capítulo uma diretriz para trabalhos futuros, contemplando as dificuldades e soluções que podem ser encontradas em um estudo de confiabilidade de um PCC.



## CAPÍTULO II. CONFIABILIDADE E TAXA DE FALHA

Para que seja possível realizar um estudo de confiabilidade de um sistema, no caso os equipamentos e instrumentos de um PCC, devem ser introduzidos alguns conceitos fundamentais sobre confiabilidade e taxa de falha.

No entanto, as teorias de confiabilidade e de taxa de falha têm como base fundamental a estatística e a probabilidade. Sendo assim, para que seja possível compreender tais teorias, deve-se primeiro ter domínio sobre os conhecimentos referentes à estatística e probabilidade.

Este capítulo não contemplou tais conhecimentos, pois o objetivo deste trabalho foi apresentar a teoria de confiabilidade para ser utilizada como uma ferramenta no projeto e avaliação de PCCs. Para que o texto não ficasse muito extenso, priorizou-se detalhar melhor conceitos sobre a confiabilidade de sistemas e redundância de componentes.

### II.1 Introdução

Geralmente, Confiabilidade é definida como a probabilidade de um sistema desempenhar sua função adequadamente por um período de tempo determinado, em um conjunto de condições operacionais. Implícita nesta definição há um conceito e critério para Falha, a qual pode ser julgada como o momento em que o sistema não está mais funcionando adequadamente. Além disso, o conjunto de condições operacionais envolve o ambiente em que o sistema deve operar, envolve as capacidades máximas e mínimas dos equipamentos e instrumentos, entre outros fatores<sup>[7]</sup>.

A variável mais importante que pode estar relacionada com a confiabilidade é o Tempo. Os fenômenos relacionados à confiabilidade são compreendidos a partir da avaliação de Taxas de Falha, que são dependentes da variável tempo<sup>[7]</sup>.



## II.1.1 Definições básicas

A confiabilidade de um sistema pode ser expressa em termos da Variável Aleatória Contínua  $t$ , definida como “o tempo para o sistema falhar”. A Função de Distribuição da Probabilidade (PDF, do inglês “*Probability Distribution Function*”) de  $t$ ,  $f(t)$ , tem o significado físico<sup>[7]</sup>:

$$f(t) \cdot \Delta t = P\{t < t \leq t + \Delta t\}$$

Equação 1

Onde o termo no lado direito da equação representa a probabilidade da falha do sistema ocorrer entre o intervalo de tempo dado por  $t$  e  $t + \Delta t$ , no limite para  $\Delta t$  tendendo à zero ( $\Delta t \rightarrow 0$ ).

Sistema pode ser definido de forma genérica como um único componente, como um equipamento ou instrumento, até combinações de vários componentes iguais ou diferentes entre si, de diversas maneiras, como uma bateria de evaporadores, uma bateria de reatores, plantas industriais, etc<sup>[7]</sup>.

A Probabilidade de Falha de um sistema é dada pela probabilidade de que ocorra uma falha antes de  $t = t$ , podendo ser expressa pela Função de Distribuição Cumulativa (CDF, do inglês “*Cumulative Distribution Function*”),  $F(t)$ <sup>[7]</sup>:

$$F(t) = P\{t \leq t\}$$

Equação 2

A CDF também pode ser expressa em função da PDF pela seguinte relação:

$$F(t) = \int_0^t f(t') dt'$$

Equação 3

A confiabilidade pode ser expressa matematicamente, de forma contrária à probabilidade de falha, pela seguinte equação:

$$R(t) = P\{t > t\}$$

Equação 4



Esta última equação pode ser entendida como a probabilidade que o sistema opere sem falha por um período de tempo  $t$ , o que é justamente a definição de confiabilidade. Já que um sistema que não falha para  $t \leq t$  deve falhar em algum  $t > t$ , utilizando o 1º axioma da probabilidade – a probabilidade deve estar em um intervalo entre zero e um – obtêm-se a seguinte relação<sup>[7]</sup>:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Equação 5

Ou de forma equivalente:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t') dt'$$

Equação 6

Ou, utilizando o 1º axioma da probabilidade:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t') dt'$$

Equação 7

Duas propriedades podem ser verificadas quando a [Equação 7](#) é avaliada:

$$R(0) = 1 \qquad R(\infty) = 0$$

Estas propriedades possuem os seguintes significados: (I) para o início da operação de um sistema ( $t = 0$ ), onde todos os equipamentos e instrumentos são novos, a probabilidade de que o sistema falhe é nula (ou que o sistema com certeza irá desempenhar sua função adequadamente). (II) Por outro lado, para um tempo de operação muito longo ( $t \rightarrow \infty$ ), onde os equipamentos e instrumentos estão degradados, a probabilidade de que o sistema falhe é total (ou que o sistema com certeza irá falhar quando for desempenhar sua função)<sup>[7]</sup>.

Obviamente que o tempo de vida útil de equipamentos e instrumentos não é infinito e, além disso, os mesmos passam por inspeções, calibrações e manutenções, o que reduz suas probabilidades de falha. Com isso, a efetuação adequada dos procedimentos de manutenção e calibração de equipamentos e instrumentos é muito importante para garantir o desempenho adequado de um sistema<sup>[7]</sup>.



Verifica-se que a função  $R(t)$  é oriunda dos conceitos de probabilidade, dada pela Função de Distribuição Cumulativa Complementar (CCDF, do inglês “*Complementary Cumulative Distribution Function*”),  $\tilde{F}(t)$ . Por analogia à CCDF, desde que  $F(t)$  representa a probabilidade de que o sistema irá falhar antes de  $t = t$ ,  $F(t)$  pode ser referida como a inconfiabilidade, podendo ser expressa por<sup>[7]</sup>:

$$\tilde{R}(t) = F(t) = 1 - R(t)$$

Equação 8

Agora, derivando a Equação 6, obtêm-se a PDF de  $t$  (“tempo para o sistema falhar”) em termos da confiabilidade  $R(t)$ <sup>[7]</sup>:

$$f(t) = -\frac{d}{dt}R(t)$$

Equação 9

Para que se tenha maior conhecimento sobre os mecanismos de falha de equipamentos e instrumentos, deve-se avaliar o comportamento da Taxa de Falha,  $\lambda(t)$ . A função que representa esta variável pode ser definida, em termos de  $R(t)$  ou  $f(t)$ . A taxa de falha pode ser definida como a probabilidade de que o sistema irá falhar em um tempo  $t < t + \Delta t$ , com a condição de que o sistema ainda não falhou em  $t = t$ . Sendo assim,  $\lambda(t)$  pode ser expressa matematicamente por uma probabilidade condicional<sup>[7]</sup>:

$$\lambda(t) \cdot \Delta t = P\{t < t + \Delta t \mid t > t\}$$

Equação 10

Utilizando a definição de probabilidade condicional, dada por:

$$P\{t < t + \Delta t \mid t > t\} = \frac{P\{(t > t) \cap (t < t + \Delta t)\}}{P\{t > t\}}$$

É possível verificar que o numerador no lado direito da expressão acima é uma forma alternativa de expressar a PDF<sup>[7]</sup>:

$$P\{(t > t) \cap (t < t + \Delta t)\} \equiv P\{t < t \leq t + \Delta t\} = f(t) \cdot \Delta t$$



O denominador é justamente  $R(t)$  (Equação 4), onde a Equação 10 para  $\lambda(t)$  resulta em:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Equação 11

A taxa de falha,  $\lambda(t)$ , também é usualmente referida como a taxa de perigo ou taxa de mortalidade<sup>[7]</sup>.

A maneira mais útil de expressar  $R(t)$  ou  $f(t)$  é em termos da taxa de falha<sup>[7]</sup>. Substituindo  $f(t)$  pela equação Equação 9 na Equação 11, o resultado obtido é dado pela seguinte expressão<sup>[7]</sup>:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{d}{dt} R(t)$$

Equação 12

A equação acima pode ser integrada e, utilizando o limite mínimo  $R(0) = 1$ , a confiabilidade pode ser expressa por<sup>[7]</sup>:

$$R(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t') dt' \right]$$

Equação 13

A função  $f(t)$  também pode ser obtida pela Equação 9:

$$f(t) = \lambda(t) \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t') dt' \right]$$

Equação 14

Um dos parâmetros mais utilizados para caracterizar a confiabilidade de um sistema é o Tempo Médio Para Falhar (MTTF, do inglês “*Mean Time To Failure*”), que é compreendido como o tempo médio para o qual o sistema terá sua primeira falha. Este parâmetro pode ser expresso pela seguinte relação<sup>[7]</sup>:

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt$$

Equação 15

É fácil mostrar que<sup>[7]</sup>:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt$$

Equação 16

## II.2 Modelagem da taxa de falha

O comportamento da taxa de falha,  $\lambda(t)$ , com o tempo, para um componente que não passa por manutenções preventivas, geralmente possui um perfil característico dado por uma curva no formato de “banheira”<sup>[7]</sup>. Um esboço deste formato de curva é apresentado na [Figura 1](#).

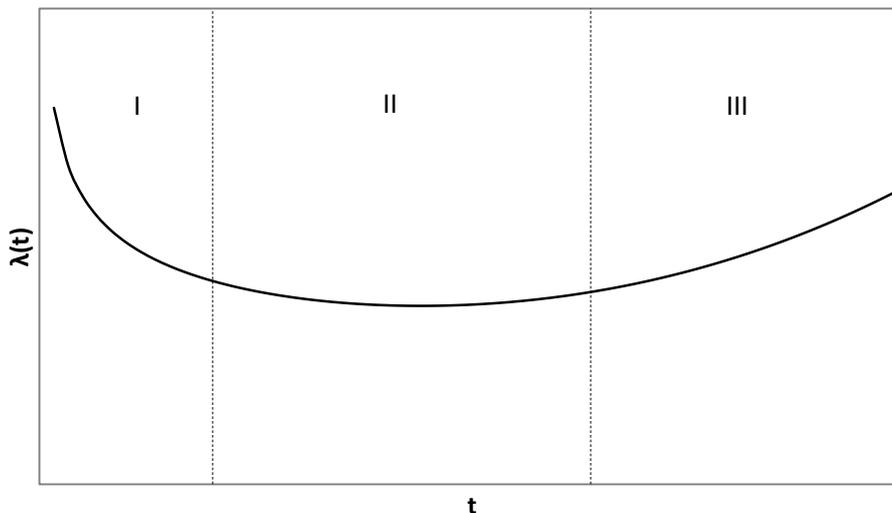


Figura 1 – Perfil característico do comportamento da taxa de falha com o tempo. Adaptado de [\[7\]](#).

Na figura acima, são apresentadas três regiões típicas do comportamento de  $\lambda(t)$  com o tempo.

A região I é caracterizada por um comportamento de alta taxa de falha, porém decrescente com o tempo. Esta região é denominada como o período de “mortalidades infantis” ou falhas recentes, pois a taxa de falha é majoritariamente causada por “mortes infantis” devido a defeitos congênitos, fragilidade do instrumento/equipamento, entre outras causas<sup>[7]</sup>.



A região II é caracterizada pelos menores valores da taxa de falha, além de ser o período de maior duração. Nesta região, a taxa de falha é praticamente constante. O período de tempo referente a esta região é denominado como o tempo de vida útil do componente. Este comportamento de taxa de falha constante, praticamente independente do tempo, é característico de falhas causadas por eventos aleatórios ou “falhas aleatórias”<sup>[7]</sup>.

A região III é caracterizada pelo aumento da taxa de falha com o tempo. Nesta região, as falhas devido ao desgaste (“aging failures”) são dominantes. Aqui, as falhas possuem como principais causas a corrosão, fraturas devido à fadiga, entre outras<sup>[7]</sup>.

## II.2.1 Taxa de falha constante

Os modelos de taxa de falha constante são os mais usados como base para descrever os fenômenos de confiabilidade. O perfil característico de  $\lambda(t)$  apresentado na [Figura 1](#), o qual é praticamente constante em um amplo período de tempo (região II), é o principal motivo pelo qual estes modelos são empregados<sup>[7]</sup>.

A utilização de um valor constante para  $\lambda(t)$  ( $\lambda(t) = \lambda_0$ ) na [Equação 13](#) resulta na expressão usualmente empregada para a confiabilidade de um componente<sup>[7]</sup>:

$$R(t) = \exp(-\lambda_0 t)$$

Equação 17

O mesmo pode ser feito para a função  $f(t)$ , quando se aplica a equação acima na [Equação 9](#), obtendo-se a seguinte expressão<sup>[7]</sup>:

$$f(t) = \lambda_0 \exp(-\lambda_0 t)$$

Equação 18

A utilização do modelo de taxa de falha constante na [Equação 16](#) resulta na seguinte expressão para o MTTF<sup>[7]</sup>:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_0}$$

Equação 19



A seguir são apresentados dois gráficos que mostram o comportamento das funções  $R(t)$ ,  $F(t)$  e  $f(t)$ , para um único componente, contra  $\lambda_0 t$ , utilizando o modelo de taxa de falha constante.

São apresentados na [Figura 2](#) os gráficos de  $R(t)$  e de  $F(t)$  Vs.  $\lambda_0 t$ . Verifica-se que o componente possui confiabilidade total ( $R(0) = 1$ ) para o início de sua operação e que apresenta um comportamento decrescente, até atingir valores próximos de zero a partir de  $\lambda_0 t = 3$ . Para a probabilidade de falha, o componente apresenta probabilidade nula no início da operação e esta probabilidade aumenta com o tempo até atingir quase 100% a partir de  $\lambda_0 t = 3$ , comportamento inverso da função  $R(t)$ . Estas características já eram esperadas, conforme os conceitos introduzidos no início deste capítulo e também pelo comportamento de funções de decaimento exponencial.

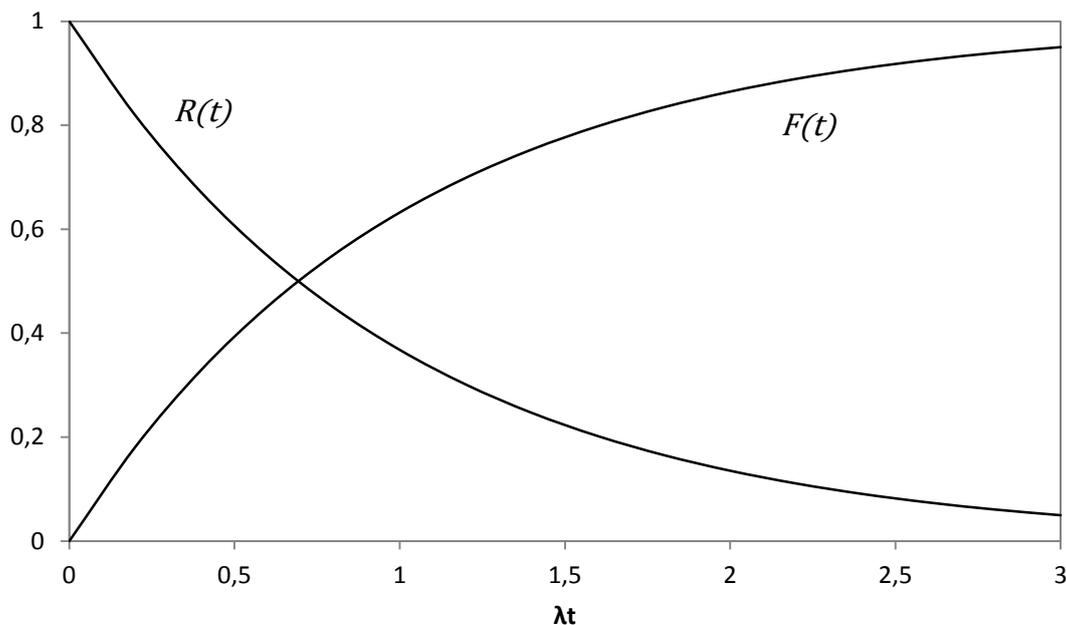


Figura 2 – Comportamento de  $R(t)$  e  $F(t)$  de um componente em função de  $\lambda_0 t$ . Adaptado de [7].

É apresentado na [Figura 3](#) o gráfico de  $f(t)$  Vs.  $\lambda_0 t$ . Esta função apresenta as mesmas características que a função  $R(t)$ , com a diferença de que o valor inicial da função,  $f(0)$ , é dado pelo valor da taxa de falha,  $\lambda_0$ .

Para o valor de  $\lambda_0 t = 1$ , as funções  $R(t)$ ,  $F(t)$  e  $f(t)$  possuem os respectivos valores de 0,3679 (36,79%), 0,6321 (63,21%) e 0,2833 (28,33%). O valor de  $\lambda_0 t = 1$  representa a condição de que  $t = MTTF$ . Para este valor de  $t$ , os valores de  $R(t)$ ,  $F(t)$  e  $f(t)$  representam que o componente possui 36,79% de operar com sucesso ou 63,21% de falhar e

que a probabilidade de falha em  $t = MTTF$  representa 28,33% do total da probabilidade de falha do componente.

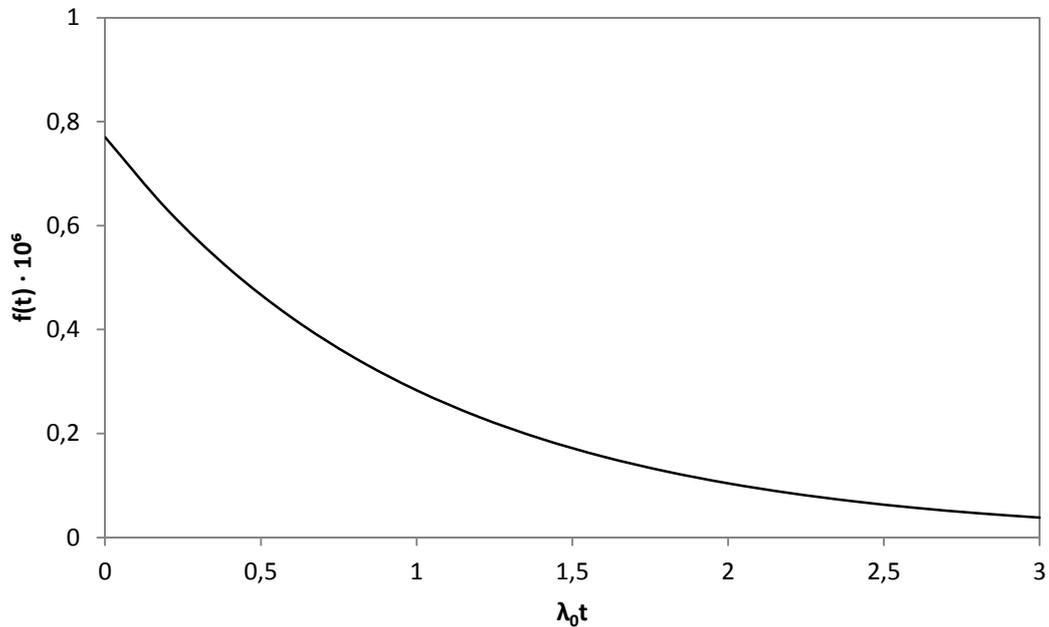


Figura 3 – Comportamento de  $f(t)$  de um componente em função de  $\lambda_0 t$ . Adaptado de [7].

## II.2.2 Probabilidade de falha na demanda

O modelo de taxa de falha constante é utilizado para o caso de um sistema ou componente (equipamento/instrumento) em operação contínua. Porém, alguns sistemas ou componentes operam intermitentemente, isto é, ficam em *stand-by* até o momento em que são acionados para desempenhar sua função. Estes são acionados porque houve uma demanda da função que é desempenhada. Com isso, o nome Probabilidade de Falha na Demanda é utilizado para representar a probabilidade de falha de um sistema ou um componente em *stand-by* quando o mesmo deveria operar[7].

A demanda de um sistema ou componente é bem genérica, podendo ser o *switch* de uma chave ou relé elétrico, abertura ou fechamento de uma válvula, o acionamento de um motor, entre outras ações de dispositivos elétricos ou mecânicos[7].

Supondo que a cada momento que a função de um sistema é demandada, a probabilidade de que o sistema opere com sucesso é  $r$ , sendo a probabilidade de falha na demanda,  $p$ , dada por[7]:



$$p = 1 - r$$

**Equação 20**

É importante ressaltar que as variáveis  $p$  e  $r$  são Variáveis Aleatórias Discretas e com isso, as demais variáveis derivadas destas também serão variáveis aleatórias discretas. Considerando que a probabilidade de falha de uma demanda é independente do número de demandas anteriores, a confiabilidade do sistema,  $R_n$ , pode ser expressa por<sup>[7]</sup>:

$$R_n = P\{X_1\}P\{X_2\}P\{X_3\} \dots P\{X_n\}$$

**Equação 21**

Onde  $X_n$  representa o evento de sucesso do sistema na  $n$ -ésima demanda. Desde que a probabilidade de sucesso para qualquer evento de demanda do sistema é igual a  $r$ , a expressão para  $R_n$  resulta em<sup>[7]</sup>:

$$R_n = r^n$$

**Equação 22**

Substituindo a [Equação 20](#) na expressão acima e aplicando o logaritmo natural em ambos os lados da equação, o resultado é dado por<sup>[7]</sup>:

$$\ln R_n = n \ln(1 - p)$$

**Equação 23**

Agora, se a probabilidade de falha na demanda,  $p$ , for muito baixa – condição real para os sistemas em campo – a expansão em série de Taylor da função  $\ln(1 - p)$  é dada por  $-p$ . Substituindo esta expansão na [Equação 23](#) e aplicando a função exponencial, a expressão para a confiabilidade do sistema resulta em<sup>[7]</sup>:

$$R_n = \exp(-np)$$

**Equação 24**

Se a taxa de demandas do sistema é praticamente constante, a expressão abaixo pode ser utilizada para calcular o número de demandas que o sistema teve antes do tempo  $t$ <sup>[7]</sup>:



$$n = \gamma t$$

Equação 25

Onde  $\gamma$  é a frequência em que o sistema é demandado, isto é, se o sistema é demandado sempre em um intervalo de tempo dado por  $\Delta t$ , então esta frequência seria dada por  $\gamma = 1/\Delta t$ . Entretanto, a taxa de falha de um sistema foi definida como sendo a probabilidade de que o sistema irá falhar em um tempo  $t < t + \Delta t$ , dada a condição de que o sistema ainda não falhou em  $t = t$ . Mas, se a probabilidade de falha do sistema é independente das demandas anteriores, então a taxa de falha aqui é constante. A seguinte expressão pode então ser utilizada para a taxa de falha<sup>[7]</sup>:

$$\lambda_0 = \gamma p$$

Equação 26

A equação acima possui o significado físico de que a taxa de falha é dada pela probabilidade de falha na demanda do sistema vezes a frequência com que este sistema é demandado. Além disso, a expressão acima possibilita que a confiabilidade de um sistema de operação descontínua pode ser expressa também pela equação [Equação 17](#)<sup>[7]</sup>.

### II.2.3 Taxa de falha total

De forma simples, um sistema ou um componente possui as seguintes etapas para realizar uma operação:

- Acionamento para desempenhar a função desejada (demanda);
- Desempenho da função (operação);
- Finalização da função, voltando o sistema ou o componente para o modo *stand-by*.

Sendo assim, o sistema ou o componente apresenta três etapas com diferentes probabilidades de falha. Além disso, a unidade utilizada para expressar a taxa de falha pode ser o tempo operacional ( $t_{op}$ ) ou o tempo do calendário ( $t_c$ )<sup>[7]</sup>.

Considerando como um exemplo um equipamento que opera alguma fração do tempo do calendário dada por  $c = t_{op}/t_c$ , e que este equipamento apresenta uma taxa de falha constante dada por  $\lambda_0$ , em unidades de tempo operacional. A contribuição da taxa de falha da



operação para a taxa de falha total do equipamento será dada por  $c\lambda_0$ , em unidades de tempo do calendário<sup>[7]</sup>.

Se for levada em conta também a probabilidade de falha na demanda, deve-se conhecer a quantidade de vezes que o equipamento é acionado. Supondo que o período de tempo, em média, que o equipamento opera é dado por  $\bar{t}_0$ , então a frequência com que o equipamento é acionado, em média, seria igual a  $1/\bar{t}_0$ , em unidades de tempo operacional. Convertendo para unidades de tempo do calendário, esta frequência seria dada então por  $c/\bar{t}_0$ <sup>[7]</sup>.

Por último, há a probabilidade de falha do equipamento em modo *stand-by*. Obviamente que a falha será percebida somente quando o equipamento for demandado ou caso haja uma inspeção de rotina. A diferença entre falha na demanda e falha em *stand-by* reside nas causas que promovem a falha. Se um elemento que promove o acionamento do equipamento falhar, então a falha deve ser classificada como falha na demanda. Se a falha ocorrer em algum elemento de operação, mas estando o equipamento inoperante, então se deve classificar a falha como falha em *stand-by*. Supondo uma taxa de falha constante do equipamento em *stand-by*, dada por  $\lambda_s$ , e sabendo que a fração do tempo do calendário que o equipamento fica em *stand-by* é dada por  $1 - c$ , a taxa de falha total pode ser expressa finalmente por<sup>[7]</sup>:

$$\lambda = \frac{c}{\bar{t}_0}p + c\lambda_0 + (1 - c)\lambda_s$$

Equação 27

Geralmente o último termo do lado direito da equação acima é muito pequeno porque o equipamento pode estar quase todo o período do tempo do calendário em operação ( $c \approx 1$ ) e também porque a taxa de falha do equipamento em *stand-by* pode ser muito baixa, podendo ser desprezada. Com isso, equipamentos que são de rápida operação devem ter seus valores de  $\lambda_s$  levados em consideração<sup>[7]</sup>.



## II.3 Confiabilidade de sistemas ou componentes interligados

Um sistema ou um conjunto de componentes interligados podem falhar devido a uma série de causas, denominadas Modos de Falha. Supondo que cada modo de falha é independente entre si, conseqüentemente o sistema irá falhar se qualquer um dos eventos dos diferentes modos de falha ocorrer. Logo, a confiabilidade do sistema é dada pela probabilidade conjunta de todos estes eventos não ocorrerem antes do tempo  $t$ . Matematicamente, isto pode ser expresso por<sup>[7]</sup>:

$$R(t) = P\{X_1 \cap X_2 \cap X_3 \dots \cap X_i \cap \dots \cap X_N\}$$

Onde  $X_i$  é o evento dado pela não ocorrência, antes do tempo  $t$ , do  $i$ -ésimo modo de falha. Como os eventos são independentes entre si:

$$R(t) = P\{X_1\}P\{X_2\}P\{X_3\} \dots P\{X_i\} \dots P\{X_N\}$$

Onde a confiabilidade do  $i$ -ésimo evento é dada por:

$$R_i(t) = P\{X_i\}$$

Com isso, a expressão resultante para a confiabilidade do sistema fica:

$$R(t) = \prod_i R_i(t)$$

**Equação 28**

Agora, se for possível relacionar o  $i$ -ésimo modo de falha,  $X_i$ , com a falha do  $i$ -ésimo componente do sistema, então  $R_i(t)$  é justamente a confiabilidade do  $i$ -ésimo componente do sistema. Substituindo a [Equação 17](#), para cada componente do sistema, na expressão acima, a confiabilidade do sistema é dada então por<sup>[7]</sup>:

$$R(t) = \exp(-\lambda_1 t) \cdot \exp(-\lambda_2 t) \cdot \dots \cdot \exp(-\lambda_i t) \cdot \dots \cdot \exp(-\lambda_N t)$$



A qual após rearranjo matemático é dada por<sup>[7]</sup>:

$$R(t) = \exp\left(-\sum_i \lambda_i t\right)$$

Agora, fazendo uma analogia com a [Equação 17](#), verifica-se que<sup>[7]</sup>:

$$\lambda = \sum_i \lambda_i$$

Equação 29

É fácil mostrar que a equação acima também é válida para o caso onde a taxa de falha é dependente do tempo. É possível também relacionar o MTTF do sistema com o MTTF de cada componente do sistema<sup>[7]</sup>:

$$\frac{1}{MTTF} = \sum_i \frac{1}{MTTF_i}$$

Equação 30

Uma observação muito importante deve ser feita. Segundo a [Equação 29](#), quanto mais componentes estiverem presentes em um sistema, maior será a taxa de falha deste. Pode-se concluir então que a confiabilidade de um sistema diminui à medida que este se torna cada vez mais complexo, isto é, possui vários componentes integrados. Com isso, os conceitos relacionados à redundância de componentes e sua influência na confiabilidade de um sistema são úteis para que seja possível fazer com que um sistema complexo seja capaz de desempenhar sua operação eficientemente e de forma garantida<sup>[7]</sup>.

### II.3.1 Redundância de componentes

Mesmo que um sistema complexo, com ausência de redundância, tenha programas altamente eficientes de inspeção e manutenção preventiva e tenha seus componentes substituídos frequentemente, sua confiabilidade ainda será reduzida<sup>[7]</sup>.

Supondo como exemplo um sistema em etapa de projeto, o qual não contemplou utilizar componentes redundantes. Para que a confiabilidade deste sistema seja alta, durante sua futura operação, é possível tomar duas possíveis medidas distintas. A primeira seria a elaboração de procedimentos de manutenção preventiva de alta qualidade, ou seja, é necessário



que recursos como mão-de-obra qualificada, ferramentas para calibração precisas, entre outros estejam disponíveis. A outra seria dada pela sugestão de se utilizar componentes de altíssima confiabilidade, isto é, componentes de alto nível tecnológico e alto custo. Em resumo, o custo fixo para efetuar a instalação deste sistema seria muito alto.

Como o sistema ainda não foi instalado, a criatividade característica de uma etapa de projeto ainda pode ser utilizada. Componentes de menor confiabilidade, porém configurados em redundância, são capazes de ter a mesma confiabilidade, ou até maior, que um único componente de alto custo e alta confiabilidade, que desempenha a mesma função.

Obviamente que uma avaliação de custo-benefício deve ser contemplada para que seja verificado o limite máximo de introdução de redundâncias no projeto do sistema. Componentes de menor confiabilidade, apesar de possuírem um custo operacional menor que os de maior confiabilidade, fazem com que o custo do sistema aumente devido à introdução de mais um componente no sistema, para obter a redundância. Com isso, um balanço de custos entre a quantidade de componentes redundantes e componentes unitários de alta confiabilidade deve ser realizado para que seja determinado o menor custo possível do sistema em projeto<sup>[7]</sup>.

Na [Figura 4](#) é apresentado um gráfico que relaciona a confiabilidade de um sistema composto por N componentes iguais com a confiabilidade do componente unitário.

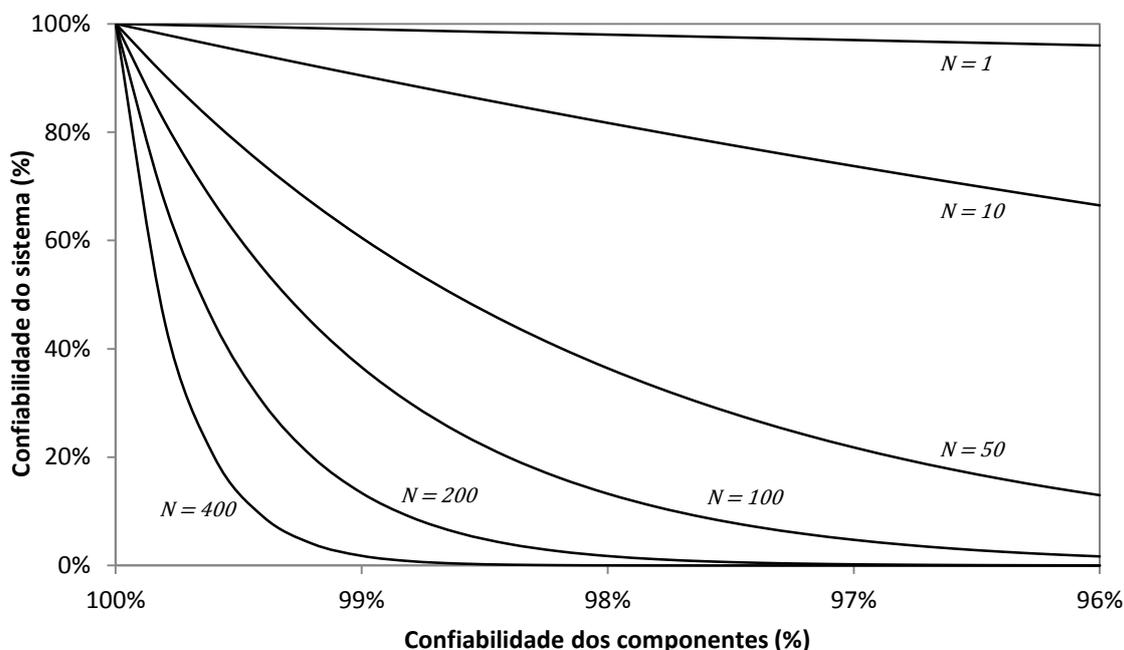


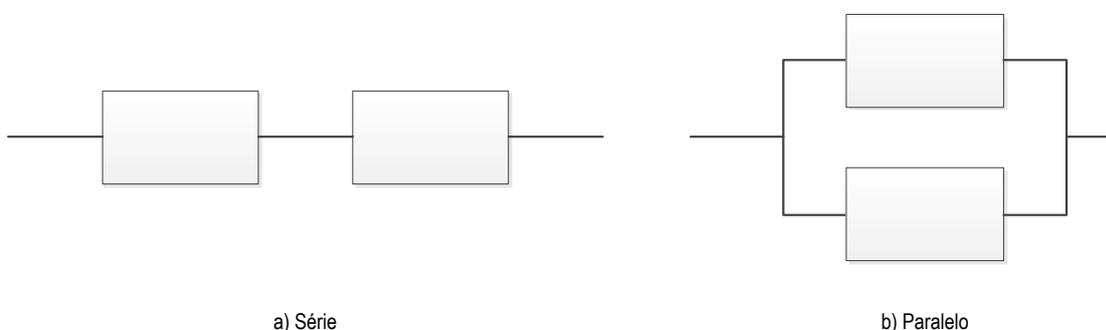
Figura 4 – Redução da confiabilidade de um sistema com N componentes integrantes. Adaptado de [\[7\]](#).



Verifica-se pela figura anterior que à medida que o número de componentes aumenta, a confiabilidade do sistema decai rapidamente com a redução da confiabilidade dos componentes. Para que um sistema composto por 10 componentes iguais tenha uma confiabilidade de 80%, seus componentes devem apresentar uma confiabilidade de aproximadamente 97,8%. Agora, para que um sistema composto por 100 componentes iguais tenha o mesmo valor para sua confiabilidade, seus componentes devem apresentar uma confiabilidade de aproximadamente 99,8%<sup>[7]</sup>.

Obviamente que sistemas nunca apresentarão somente um único tipo de componente, mas é possível apresentar pela [Figura 4](#), de forma didática, como que a confiabilidade de um sistema decai rapidamente simplesmente com a quantidade de componentes que o integram. A redundância se mostra então como uma ferramenta para amortecer esta redução da confiabilidade do sistema devido à quantidade de componentes integrantes<sup>[7]</sup>.

A representação gráfica de sistemas utilizando diagramas de blocos é usualmente utilizada para que seja possível visualizar a configuração entre os componentes integrantes do sistema. Na [Figura 5](#) é apresentado um exemplo de componentes em série e de componentes em paralelo (redundantes)<sup>[7]</sup>.



**Figura 5 – Representação em diagrama de blocos dos componentes de um sistema. a) Componentes em série. b) Componentes em paralelo. Adaptado de [\[7\]](#).**

Esta representação mostra claramente como é o raciocínio sobre o modo de falha de um sistema. Para que um sistema de componentes em série falhe (representação “a”), basta que um dos componentes falhe. Para que um sistema de componentes em paralelo falhe (representação “b”), os dois componentes devem falhar para interromper o fluxo da informação<sup>[7]</sup>.



### II.3.2 Componentes em paralelo: Redundância ativa

A confiabilidade de um sistema de dois componentes em redundância ativa (componentes em paralelo),  $R_a(t)$ , pode ser definida como a probabilidade de sucesso do componente 1 ou do componente 2 após o tempo  $t$ . Se as variáveis aleatórias contínuas  $t_1$  e  $t_2$  representam o tempo para falha dos componentes 1 e 2 respectivamente, a função  $R_a(t)$  pode ser expressa matematicamente por<sup>[7]</sup>:

$$R_a(t) = P\{t_1 > t \cup t_2 > t\}$$

Equação 31

Utilizando os conceitos de probabilidade, a expressão acima pode ser escrita em termos das probabilidades de cada evento<sup>[7]</sup>:

$$R_a(t) = P\{t_1 > t\} + P\{t_2 > t\} - P\{t_1 > t \cap t_2 > t\}$$

Equação 32

Assumindo agora que as falhas dos componentes são eventos independentes, o último termo do lado direito da equação acima pode ser substituído e, sabendo que  $R_i(t) = P\{t_i > t\}$ , a expressão resultante fica<sup>[7]</sup>:

$$R_a(t) = R_1(t) + R_2(t) - R_1(t)R_2(t)$$

Equação 33

Utilizando o modelo de taxa de falha constante para  $R_i(t)$  (Equação 17) e supondo que estão sendo utilizados dois componentes iguais na redundância<sup>[7]</sup>:

$$R_a(t) = 2 \exp(-\lambda_i t) - \exp(-2\lambda_i t)$$

Equação 34

Onde  $\lambda_i$  representa a taxa de falha constante do componente  $i$  (componente unitário). A aplicação da Equação 12 na equação acima gera uma expressão para a taxa de falha do sistema que depende do tempo, apesar da taxa de falha dos componentes ser constante<sup>[7]</sup>:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \left( \frac{1 - \exp(-\lambda_i t)}{1 - 0,5 \exp(-\lambda_i t)} \right)$$

Equação 35

São apresentados na [Figura 6](#) os gráficos de  $R_i(t)$  e  $R_a(t)$  Vs.  $\lambda_i t$ , sendo possível realizar uma comparação entre as duas curvas. Observa-se que, para a função  $R_a(t)$ , no início da curva (para valores iniciais de  $\lambda_i t$ ) há uma região onde o decaimento da função é mais lento do que da função  $R_i(t)$  [7].

São apresentados na [Figura 7](#) os gráficos de  $\lambda_i(t)$  e  $\lambda_a(t)$  Vs.  $\lambda_i t$ . Diferentemente da taxa de falha constante para um único componente, a função  $\lambda_a(t)$  aumenta à medida que o tempo cresce e possui valor nulo para o tempo igual a zero ( $\lambda_a(0) = 0$ ). Para valores de  $\lambda_i t \rightarrow \infty$ , a função  $\lambda_a(t)$  tende para o valor assintótico de  $\lambda_i$  [7].

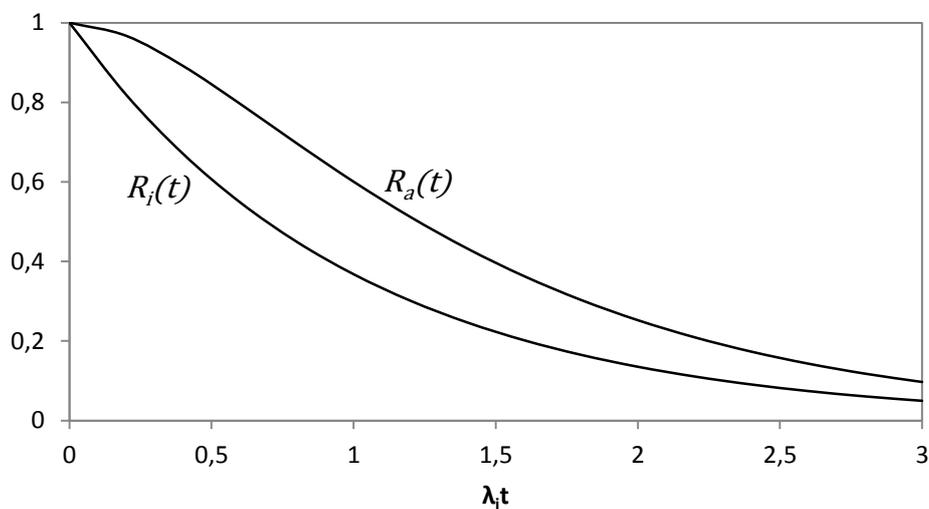


Figura 6 – Comparação entre  $R(t)$  de um único componente e de dois componentes em paralelo. Adaptado de [7].

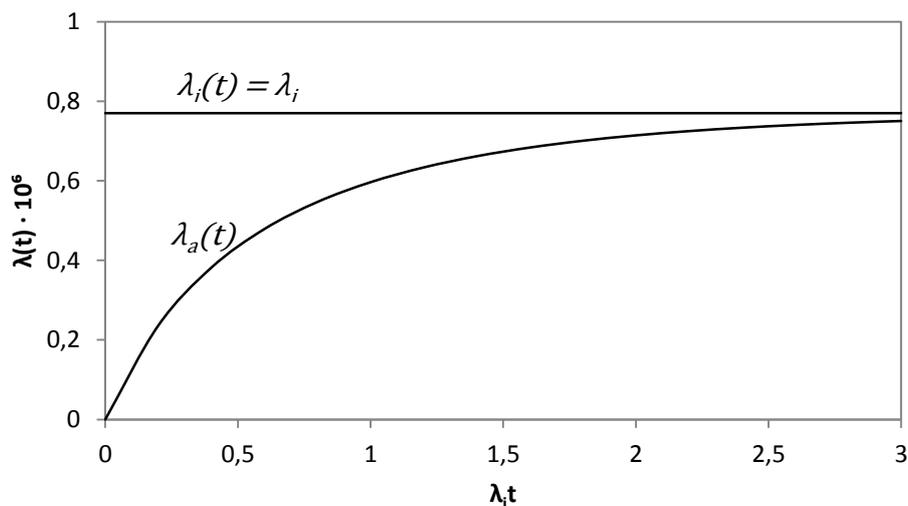


Figura 7 – Comparação entre  $\lambda(t)$  de um único componente e de dois componentes em paralelo. Adaptado de [7].



É possível também obter uma expressão para o MTTF de dois componentes em redundância ativa. No caso, esta expressão é escrita em função do MTTF de um único componente<sup>[7]</sup>:

$$MTTF_a = \frac{3}{2} MTTF_i$$

Equação 36

A equação acima mostra que a utilização de dois componentes em paralelo, ao invés de um único componente, aumenta em 50% o tempo médio para o qual deve ocorrer falha do sistema.

### II.3.3 Limitações da redundância de componentes

Os resultados apresentados anteriormente para a confiabilidade de sistemas que possuem redundância são bastante idealizados. Na prática, uma série de fatores pode significativamente reduzir a confiabilidade de um sistema redundante. Estes fatores e as respectivas mitigações para minimizar seus efeitos são frequentemente as causas dominantes para a determinação do nível de confiabilidade que pode ser alcançado. Como exemplo, para sistemas com redundância ativa, as falhas de modo em comum e a divisão de carga são os principais fenômenos que devem ser levados em consideração<sup>[7]</sup>.

#### II.3.3.1 Modos de falha em comum

Os modos de falha em comum são causados por fenômenos que criam dependências entre dois ou mais componentes redundantes, fazendo com que estes falhem simultaneamente. Tais falhas possuem o potencial de acabar com todos os benefícios adquiridos pela elaboração de uma configuração redundante. Modos de falha em comum podem ser causados pela falha de conexões elétricas em comum, estresse devido à exposição em um ambiente adverso (pó, vibração, etc.), problemas de manutenção em comum, entre outros fatores<sup>[7]</sup>. Nota-se também que a suposição de que os eventos da falha dos componentes são independentes entre si não é mais válida quando é assumido que podem ocorrer modos de falha em comum.

Entretanto, analisando os modos de falha em comum em termos de diagramas de blocos, este tipo de falha possui o mesmo efeito dado pela adição de um “componente hipotético” em série com a configuração em paralelo<sup>[7]</sup>. Isto é possível, pois caso este



“componente hipotético” falhe, o sistema todo irá falhar e esta consequência iria ocorrer também se ambos os componentes redundantes falhassem simultaneamente.

Para dois componentes idênticos, a confiabilidade do sistema com a adição deste “componente hipotético” pode ser expressa matematicamente por<sup>[7]</sup>:

$$R'_a(t) = [2R_i(t) - R_i^2(t)] \cdot R'(t)$$

Equação 37

Onde a função  $R_i(t)$  representa a confiabilidade do componente, com eventos de falha independentes, e a função  $R'(t)$  representa o “componente hipotético” com eventos de falhas em comum. Sabendo que os modos de falha em comum são intrínsecos aos componentes, pode-se modelar a taxa de falha de um único componente em termos de uma taxa de falha que representa eventos independentes,  $\lambda_{IND}(t)$ , e de uma taxa de falha que representa eventos de falha em comum,  $\lambda'(t)$ . Ou seja,  $\lambda_i(t)$  pode ser expresso matematicamente por<sup>[7]</sup>:

$$\lambda_i(t) = \lambda_{IND}(t) + \lambda'(t)$$

Equação 38

Definindo o fator  $\beta$  como sendo a razão entre a taxa de falha em comum,  $\lambda'(t)$  e a taxa de falha total do componente,  $\lambda_i(t)$ , a Equação 37 pode ser reescrita, utilizando-se o modelo de taxa de falha constante<sup>[7]</sup>:

$$R'_a(t) = (2 - \exp[-(1 - \beta)\lambda_i t]) \exp(-\lambda_i t)$$

Equação 39

Onde  $\lambda_i$  representa a taxa de falha total de um único componente, dado por um valor constante e independente do tempo. O efeito da redução da confiabilidade pode ser mais facilmente verificado pela avaliação do MTTF<sup>[7]</sup>:

$$MTTF'_a = \left(2 - \frac{1}{2 - \beta}\right) MTTF_{IND}$$

Equação 40



É possível mostrar pela expressão acima que o limite máximo do fator que relaciona o  $MTTF'_a$  com o  $MTTF_{IND}$  é igual a  $3/2$  ( $\beta = 0$ ) e que o limite mínimo é igual a 1 ( $\beta = 1$ ). Logo, pode-se verificar que um sistema sem possibilidade de falhas em comum ( $\beta = 0$ ) é um “sistema ideal” e que com o aumento da probabilidade de ocorrer falhas em comum ( $\beta \rightarrow 1$ ), o sistema se apresenta como um sistema de componentes em série.

Agora, com o objetivo de avaliar a magnitude do efeito dos modos de falha em comum, se a [Equação 37](#) for reescrita em termos da probabilidade de falha,  $F(t)$ , sua expressão resulta em:

$$F'_a(t) = F'(t) + F_i^2(t) - F'(t)F_i^2(t)$$

Equação 41

Supondo que um sistema tenha, em um tempo  $\bar{t}$ , uma probabilidade de falha em comum igual a  $10^{-9}$  e que seus componentes tenham uma probabilidade de falha igual a  $10^{-6}$ , sendo estas falhas independentes entre si (sendo a probabilidade de falha em comum 1000 vezes menor que a falha total), a probabilidade de falha do sistema teria então o seguinte valor<sup>[7]</sup>:

$$F'_a(t = \bar{t}) = 10^{-9} + 10^{-12} - 10^{-21} \cong 1,001 \cdot 10^{-9}$$

Este resultado para a probabilidade de falha do sistema mostra que a falha do mesmo é praticamente dominada por eventos de falha em comum. Mesmo assim, esta probabilidade de falha ainda é muito menor comparada com a probabilidade de falha de um único componente<sup>[7]</sup>.

Um dos principais desafios para a engenharia de sistemas redundantes é identificar e eliminar os possíveis mecanismos de modos de falha em comum. No entanto, alguns mecanismos talvez sejam impossíveis de serem eliminados por completo e, com isso, devem ser contemplados na modelagem da taxa de falha<sup>[7]</sup>.

### II.3.3.2 Divisão de carga

A divisão de carga é outra causa associada à redução da confiabilidade de um sistema com redundância ativa. Por exemplo, para motores, bombas, vigas estruturais e vários outros componentes em redundância ativa, a falha de um componente irá aumentar o nível de estresse nos demais, fazendo com que a taxa de falha destes aumente. Carga pode ser definida de forma genérica como a capacidade sendo imposta sobre o componente, como a pressão aplicada em



vigas de estruturas, vazão de escoamento de fluidos em bombas, a voltagem em dispositivos eletrônicos, etc.<sup>[7]</sup>

Felizmente, para um sistema redundante que apresente capacidade suficiente, o aumento na taxa de falha não deve resultar em uma probabilidade de falha alta. Se a primeira falha é detectada, o sistema pode ser demandado para operar por um curto período de tempo antes que reparos sejam realizados. Como exemplo, se um motor da turbina de um avião falhar, o projeto correto do avião admite que este possa continuar o voo por um período de tempo suficiente para aterrissagem em um aeroporto, sem que isto incorra em uma probabilidade significativa da falha de um segundo motor. A partir deste pressuposto, a redução da confiabilidade é menos relevante do que a redução ocasionada por modos de falha em comum<sup>[7]</sup>.

## II.3.4 Redundâncias múltiplas

### II.3.4.1 Redundância ativa 1/N

Um sistema composto por N componentes em paralelo irá operar com sucesso se quaisquer dos N componentes funcionarem adequadamente. Logo, todos os componentes devem falhar simultaneamente para que o sistema falhe. Sendo  $X_i$  a representação do evento de falha do i-ésimo componente e  $X$  a representação do evento de falha do sistema<sup>[7]</sup>:

$$X = X_1 \cap X_2 \cap X_3 \dots \cap X_i \cap \dots \cap X_N$$

A confiabilidade do sistema pode ser expressa matematicamente por:

$$R_{a(N)}(t) = 1 - P\{X_1 \cap X_2 \cap X_3 \dots \cap X_i \cap \dots \cap X_N\}$$

**Equação 42**

Considerando que as falhas são mutuamente independentes:

$$R_{a(N)}(t) = 1 - P\{X_1\}P\{X_2\}P\{X_3\} \dots P\{X_i\} \dots P\{X_N\}$$

**Equação 43**

Sabendo que  $P\{X_i\} = 1 - R_i$ , a equação acima pode ser expressa por:

$$R_{a(N)}(t) = 1 - \prod_i^N (1 - R_i)$$

**Equação 44**



E para N componentes iguais:

$$R_{a(N)}(t) = 1 - (1 - R_i)^N$$

Equação 45

É apresentado na [Figura 8](#) um gráfico que relaciona a confiabilidade de um sistema composto por N componentes iguais, em redundância, com a confiabilidade destes componentes. Verifica-se que à medida que o número de componentes em redundância aumenta, é possível obter valores para a confiabilidade do sistema praticamente iguais a 100%, mesmo que os componentes tenham confiabilidade baixa.

Por exemplo, para que um sistema apresente 90% de confiabilidade, a configuração com apenas um componente faz com que a confiabilidade deste deva ser igual a 90%. Para a configuração com dois componentes redundantes, os mesmos 90% de confiabilidade do sistema são obtidos com componentes de confiabilidade aproximadamente igual a 69%.

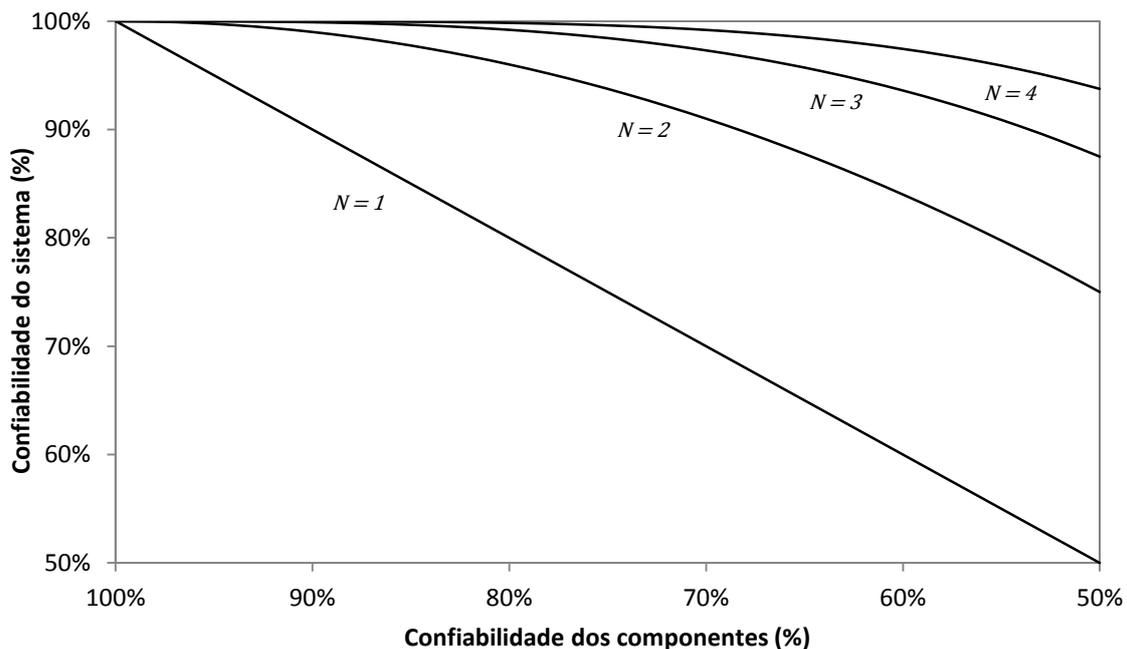


Figura 8 – Dependência da confiabilidade de um sistema em redundância ativa 1/N com a confiabilidade dos componentes. Adaptado de [7].



Agora, utilizando-se a expansão binomial, a [Equação 45](#) pode ser reescrita<sup>[7]</sup>:

$$R_{a(N)}(t) = 1 - \sum_{k=0}^N C_k^N (1)^{N-k} (-1)^k (R_i)^k = 1 - \sum_{i=0}^N C_k^N (-1)^k (R_i)^k$$

O primeiro termo do somatório é dado por  $C_0^N$  e possui valor igual a 1. Calculando este primeiro termo, a expressão acima resulta em<sup>[7]</sup>:

$$R_{a(N)}(t) = \sum_{k=1}^N C_k^N (-1)^{k-1} (R_i)^k$$

**Equação 46**

É fácil mostrar que, aplicando-se a [Equação 12](#) na expressão acima, para o modelo de taxa de falha constante, a taxa de falha do sistema de redundância ativa 1/N pode ser expressa por:

$$\lambda_{a(N)}(t) = \lambda_i \frac{\sum_{k=1}^N C_k^N (-1)^{k-1} \cdot k \cdot \exp(-k\lambda_i t)}{\sum_{k=1}^N C_k^N (-1)^{k-1} \exp(-k\lambda_i t)}$$

**Equação 47**

Agora, utilizando a [Equação 16](#) para calcular o MTTF e utilizando também o modelo de taxa de falha constante, a expressão para cômputo do MTTF do sistema de redundância ativa 1/N é dado por<sup>[7]</sup>:

$$MTTF_{a(N)} = \sum_{k=1}^N (-1)^{k-1} \frac{C_k^N}{k\lambda_i}$$

**Equação 48**

Na [Figura 8](#) mostra-se que, em princípio, é possível obter valores para a confiabilidade do sistema praticamente iguais a 100%. É possível notar pela figura que a partir de  $N = 3$  não há mais um incremento significativo na confiabilidade do sistema, quando se utilizam componentes iguais de confiabilidade relativamente alta (superior a 80%). No entanto, não há nada afirmado quando se utilizam componentes de confiabilidade baixa, desde que os efeitos relativos aos eventos de modo de falha em comum vão aumentando à medida que se utilizam mais componentes em redundância ativa<sup>[7]</sup>.



Deseja-se mostrar então o quão grande deve ser a probabilidade de falha em comum dos componentes para que uma configuração em redundância ativa  $1/N$  não seja mais eficaz no aumento da confiabilidade do sistema redundante. Isto pode ser avaliado pela verificação de um limite máximo para o fator  $\beta$  juntamente com o número  $N$  de componentes em paralelo. Relembrando, o fator  $\beta$  é definido como sendo a razão entre a taxa de falha em comum,  $\lambda'(t)$  e a taxa de falha total do componente,  $\lambda_i(t)$  (Ver [Equação 38](#)).

Utilizando-se a [Equação 46](#), pode-se expressar matematicamente a confiabilidade de um sistema de  $N$  componentes iguais em paralelo corrigida ( $R'_{i,\alpha(N)}$ ), com a introdução de um “componente hipotético” representando eventos de falha em comum ( $R_i'$ ), pela seguinte equação:

$$R'_{i,\alpha(N)}(t) = \left( \sum_{k=1}^N C_k^N (-1)^{k-1} (R_i)^k \right) \cdot R_i'(t)$$

Equação 49

Onde  $R_i$  é a confiabilidade do componente unitário. Utilizando-se o modelo de taxa de falha constante e a definição do fator  $\beta$ , a equação acima resulta na seguinte expressão, em termos de  $\lambda_{IND}$ :

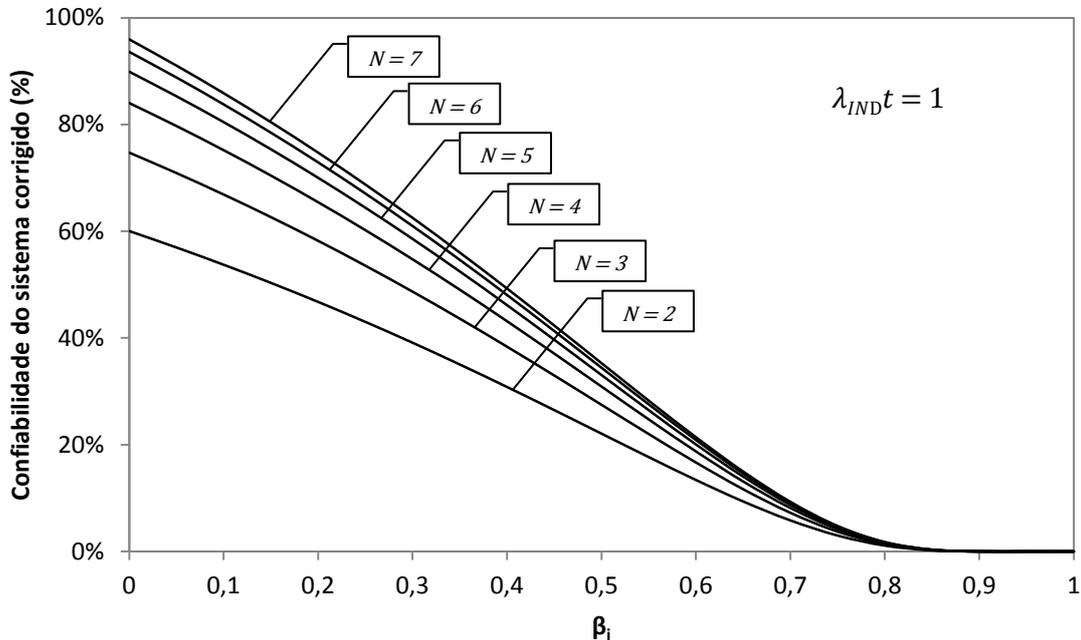
$$R'_{i,\alpha(N)}(t) = \left( \sum_{k=1}^N C_k^N (-1)^{k-1} \exp[-k\lambda_{IND}t] \right) \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\beta_i}{1 - \beta_i} \right) \lambda_{IND}t \right]$$

Equação 50

Pode-se notar que, na [Equação 49](#), o somatório refere-se à função que representa a confiabilidade de um sistema ideal de  $N$  componentes iguais em paralelo ( $R_{i,\alpha(N)}$ ) e que a função exponencial que multiplica este somatório refere-se a função que representa a confiabilidade dos eventos de falha em comum ( $R_i'$ ). Sendo assim, para se calcular a confiabilidade do sistema corrigido, é necessário apenas multiplicar  $R_{i,\alpha(N)}$  pela já mencionada função exponencial<sup>[7]</sup>.



Na [Figura 9](#) é apresentado um gráfico de  $R'_{i,\alpha(N)}$  Vs.  $\beta_i$  para valores de  $\lambda_{IND}t = 1$  e para vários valores de  $N$ .



**Figura 9** – Efeito do fator  $\beta$  na confiabilidade de sistemas em redundância ativa  $1/N$  para  $\lambda_{IND}t = 1$ . Adaptado de [7].

Pode-se verificar a saturação do efeito de aumento da confiabilidade do sistema com o aumento de  $N$ . Pela figura acima, somente a partir de  $N = 5$  que o aumento da confiabilidade se torna insignificante, um resultado diferente do concluído pela verificação da [Figura 8](#), que indica uma saturação a partir de  $N = 3$ .

Agora, para componentes que apresentem um valor para a taxa de falha dado por  $\lambda_{IND}/2$  (ou seja, aumentar a confiabilidade do componente unitário) e se for mantido o mesmo valor para o tempo, o valor de  $\lambda_{IND}t$  resultante será igual a 0,5. Na [Figura 10](#) é apresentado um gráfico semelhante ao da [Figura 9](#), porém para valores de  $\lambda_{IND}t = 0,5$  ( $R_i(\lambda_{IND}t = 1) = 36,79\%$ ,  $R_i(\lambda_{IND}t = 0,5) = 60,65\%$ ).

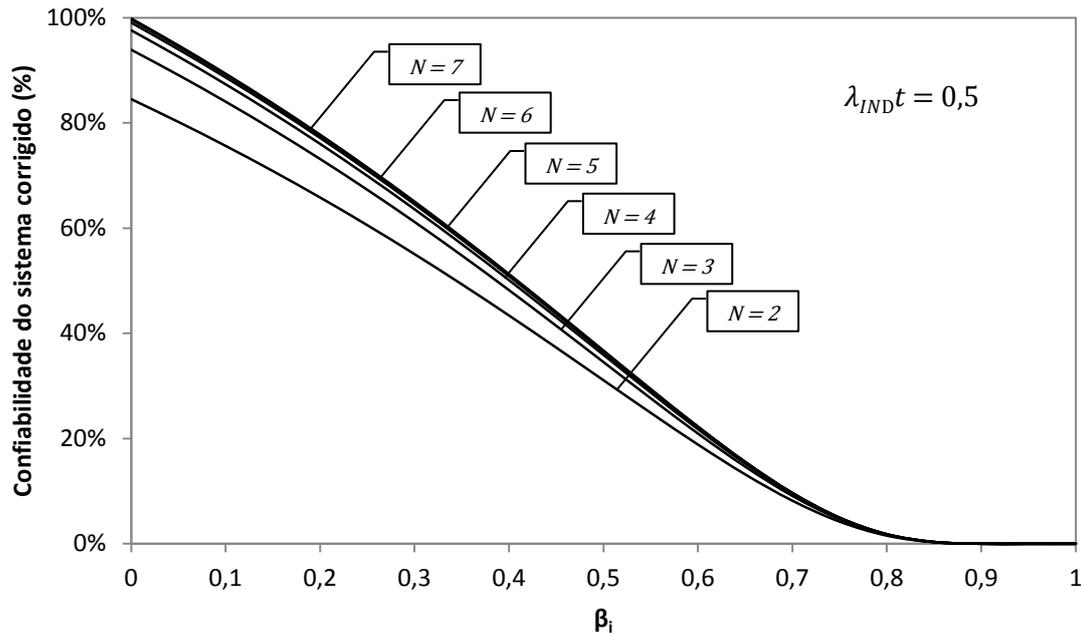


Figura 10 – Efeito do fator  $\beta$  na confiabilidade de sistemas em redundância ativa  $1/N$  para  $\lambda_{IND}t = 0,5$ . Adaptado de [7].

Verifica-se pela figura acima que ocorre, a partir de  $N = 3$ , a saturação do efeito de aumento da confiabilidade do sistema, sendo este resultado coerente com o concluído pela verificação da Figura 8. Vale ressaltar que este resultado ocorreu para uma confiabilidade do componente unitário igual a 60,65%, um valor relativamente baixo. Pode-se concluir que a utilização de no máximo três componentes em paralelo é recomendada devido ao baixo custo-benefício obtido pelo aumento insignificante da confiabilidade do sistema contra o aumento do custo da compra e operação de um novo componente.

Além disso, deve-se considerar também que os fenômenos de divisão de carga aumentam a probabilidade de falha de um sistema à medida que os componentes redundantes vão falhando. Por exemplo, um avião de quatro turbinas, voando somente com uma, é esperado estar em maiores condições de estresse do que um avião de duas turbinas voando somente com uma. Com isso, a utilização de muitos componentes em paralelo (o que acarreta no aumento da capacidade de carga do sistema) pode reduzir a confiabilidade do sistema do que promover seu aumento[7].

### II.3.4.2 Redundância ativa m/N

Um diagrama de blocos representando um sistema de redundância ativa 2/3 é apresentado na [Figura 11](#)<sup>[7]</sup>:

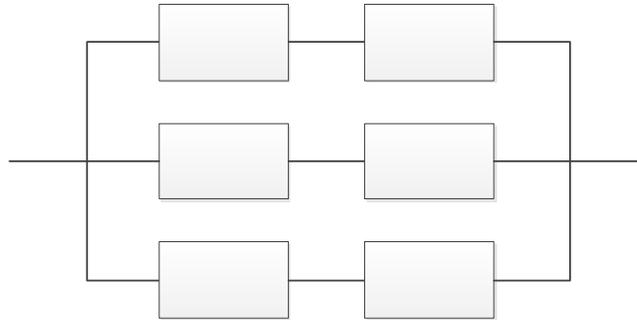


Figura 11 – Diagrama de blocos representando um sistema de redundância ativa 2/3. Adaptado de [\[7\]](#).

Esta classificação de sistemas de redundância ativa m/N deve ser compreendida como um sistema que apresenta N ramificações em redundância, onde cada ramificação possui m componentes em série. Logo, para o sistema 2/3, se tem três ramificações e dois componentes em série para cada ramificação, totalizando seis componentes.

A redundância ativa m/N é típica de sistemas de válvulas de alívio, bombas, motores, etc. Este tipo de sistema é amplamente utilizado em sistemas de controle e instrumentação principalmente para se prevenir as consequências indesejáveis da atuação espúria de um componente, onde o próximo componente em série não iria atuar. Este objetivo também pode ser alcançado quando se utiliza um sistema que elimina envios de sinais de *output* anormais (*voting system*), quando colocado em série com um sistema de elementos de medida em paralelo (medição da temperatura, pressão, vazão, etc.), aumentando a confiabilidade de uma malha de instrumentação<sup>[7]</sup>.

Devido a diversidade de componentes e configurações possíveis, a utilização das equações básicas apresentadas na [Seção II.3](#) é mais apropriada para se obter equações específicas para um determinado sistema de redundância ativa m/N. Além disso, a partir de certa complexidade de um sistema em avaliação, apenas as equações básicas, ou até somente os conceitos de probabilidade, são capazes de serem utilizados para obtenção de expressões para o cálculo da confiabilidade do sistema. Em certas ocasiões, a obtenção de uma expressão é tão trabalhosa que se torna mais fácil efetuar diretamente o cálculo numérico da confiabilidade do sistema, em termos da confiabilidade de seus componentes e da configuração entre eles.



## CAPÍTULO III. DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO

### III.1 Histórico

Fundada em 1951, a Nápoles se tornou a primeira indústria de massas de pastel do Rio de Janeiro. Logo no seu 1º ano, produzia, também, massas de pizza e lasanha. Poucos anos depois, o controle da empresa passava para dois irmãos libaneses, que comandariam a fábrica por mais de vinte anos. Em abril de 1984, a empresa foi transferida para uma família tradicionalmente italiana, que comanda a Nápoles até hoje. Atualmente, a Nápoles possui como principal atividade a produção de massas alimentícias, com um total de 310 funcionários e capacidade instalada de aproximadamente 3.120 t/ano.

Ao longo dos anos a empresa se expandiu para outros segmentos como bolos, salgados, biscoitos palmeira e bolacha de água e sal. Com a mudança de direção, novas tecnologias foram implantadas e a produção focada apenas em massas frescas.

Atuando há 60 anos no mercado do estado do Rio de Janeiro, recentemente começou sua expansão para outros estados. Seus canais de distribuição são: *food service*, varejo e atacados, tendo sua maior representação na cadeia de supermercados. A Nápoles possui como missão produzir alimentos para seus consumidores com qualidade, respeito e dedicação, colaborando com a nutrição das pessoas.

Profissionais altamente especializados foram contratados para ajudar a gerenciar as mudanças e o processo de crescimento da empresa. Ainda em 1988, o parque de produção aumentou em 1.400 m<sup>2</sup>, crescendo assim a linha e volume de produtos. Novas máquinas foram importadas da Itália e começava então a produção de talharim, ravióli e capelete. A década de 90 começou com a importação de novas máquinas italianas que melhorariam a eficiência e segurança na produção de massas e pizza. Em 1999, a Nápoles investiu na produção dos famosos pastéis, melhorando ainda mais a já reconhecida qualidade. A expansão continuou com o lançamento da Piccoli Pizza, produto destinado às crianças, e, também, com a ampliação da frota de caminhões em 2009.



Os esforços na produção continuaram, foi construído o Laboratório de Controle de Qualidade com a finalidade de avaliar a qualidade dos produtos internamente, gerando maior rapidez e confiança para a empresa. Em pleno funcionamento desde 2008, o laboratório e sua equipe agregaram ainda mais funcionalidade e qualidade à empresa.

## **III.2 Linha de produtos**

A linha de produtos da Nápoles consiste em:

Capelete de carne	Ravióli de carne
Capelete de frango	Ravióli de frango
Capelete de queijo	Ravióli de queijo
Fagotini de carne	Pastéis aperitivos recheio queijo
Fagotini de frango	Talharim
Fagotini de queijo	Nhoque
Massa de lasanha	Massa para pastéis
Massa de Pizza	Pizza semi-pronta

Todos os produtos são caracterizados por serem do tipo massa fresca e são perecíveis. Eles também necessitam de armazenamento sob condições de refrigeração (temperaturas entre 4 °C e 5 °C) para conservação, conforme o uso pretendido<sup>[8]</sup>.

Cabe ressaltar que todos os produtos fabricados pela empresa são isentos de registro junto à Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), segundo a resolução RDC nº 27, de 06 de agosto de 2010<sup>[9]</sup>.

## **III.3 Sistema de gestão da segurança dos alimentos**

Todos os trabalhos referentes ao Controle de Qualidade, à Garantia de Qualidade e à Segurança dos Alimentos são de responsabilidade do departamento de qualidade. Este departamento é composto por um engenheiro de alimentos, que atua como coordenador e gestor das respectivas tarefas. Sendo assim, todos os departamentos da empresa possuem responsabilidades quanto à segurança dos produtos fabricados.



Conforme a Portaria SVS/MS nº 1428 de 26 de novembro de 1993<sup>[4]</sup> e a Resolução RDC nº 275, de 21 de outubro de 2002<sup>[10]</sup> é obrigação das indústrias processadoras de alimentos de elaborar um Manual de Boas Práticas de Fabricação, o qual deve descrever detalhadamente:

- A linha de produtos fabricada pela empresa;
- Os recursos humanos que impactam na segurança dos alimentos, assim como os requisitos necessários como os procedimentos para avaliação médica, procedimentos de capacitação, entre outros;
- As edificações e instalações da planta industrial, ressaltando os aspectos de saneamento das áreas internas e externas;
- Os equipamentos utilizados pela empresa em seus processos produtivos, assim como as respectivas especificações técnicas de cada equipamento;
- A higienização da empresa, ressaltando os procedimentos de higienização dos equipamentos e do Controle Integrado de Pragas;
- A relação de matérias-primas, ingredientes e insumos utilizados na fabricação dos produtos, assim como das respectivas empresas fornecedoras e dos procedimentos de recebimento;
- Os processos produtivos existentes na planta industrial, onde são explicadas cada etapa de cada processo;
- As operações relacionadas ao controle de qualidade e *recall* de produtos;
- Uma lista dos Procedimentos Operacionais Padronizados (POPs) existentes, assim como da relação de cada um deles com as necessidades exigidas pelas BPF.

A Massas Nápoles LTDA. possui um manual de BPF que contém informações sobre os aspectos listados acima e está adequado às exigências da legislação brasileira.

A administração industrial consiste dos encarregados de cada setor de produção, que são liderados pelo gerente industrial. É uma equipe de cinco pessoas, as quais possuem anos de experiência nos respectivos setores que trabalham. A equipe está constantemente se aperfeiçoando, recebendo treinamentos, estando em constante contato com os gerentes da empresa e orientando os funcionários para garantir que os produtos sejam fabricados em condições adequadas. Os setores de produção se dividem conforme os processos produtivos existentes na planta industrial:



- Setor Pastel: Produção de massas para pastéis (pastel redondo, retangular e pastel em rolo);
- Setor Lasanha: Produção de massa de lasanha (em folhas);
- Setor Pizza: Produção de pizza e Piccolli pizza (mini-pizza);
- Setor Massas: Produção de ravióli, capelete e fagotini (carne, queijo e frango), pastel aperitivo sabor queijo, nhoque e talharim;
- Setor Recheio: Produção dos recheios de carne, queijo e frango, farinha de rosca e montagem de pizza semi-pronta.

As BPF e os POPs são monitorados constantemente pelos encarregados dos setores, os quais repassam ao coordenador de qualidade registros do andamento da produção, nos quais há informações relevantes sobre as questões de higiene antes, durante e após a produção.

### **III.3.1 Plano HACCP**

A empresa não possui um plano e um sistema HACCP implantado, mas o departamento de qualidade tem total conhecimento dos perigos potenciais existentes nos processos produtivos, assim como das etapas do processo e respectivas medidas de controle que eliminam ou reduzem estes perigos.

Devido à ausência de um plano HACCP elaborado para a planta industrial da empresa, não há etapas do processo classificadas como PCCs, acarretando um sério problema para o desenvolvimento deste trabalho. A identificação dos perigos de maior risco e sua relação com as etapas do processo responsáveis pelo controle destes perigos são informações obtidas somente após um estudo de HACCP.

No entanto, estas informações apenas não estão documentadas oficialmente. Além disso, apenas não há documentação referente a uma análise de perigos. Todas as normas e procedimentos referentes às BPF e respectivos POPs estão documentadas e fornecem uma base para se realizar uma análise prévia dos perigos potenciais.

Foi possível obter muitas informações do manual de BPF e dos POPs, principalmente das condições de higiene e adequação das instalações e edificações, assim como da higienização dos equipamentos. A gerência industrial e o departamento de qualidade, juntamente com os encarregados dos setores, também forneceram informações importantes sobre o processo produtivo, variáveis de processo relevantes à segurança dos alimentos e das



características dos produtos relevantes ao crescimento dos microrganismos, como a atividade de água ( $A_w$ ), pH, entre outras.

Sendo assim, foi possível realizar o estudo de confiabilidade de algumas etapas que foram selecionadas como PCCs. A metodologia desta seleção, assim como da análise prévia dos possíveis perigos serão apresentadas no [CAPÍTULO IV](#).

### **III.3.2 Departamento de Vendas e Expedição**

A equipe de vendas e expedição consiste do gerente, dos promotores de venda e dos encarregados de expedição. O gerente atua como líder, coordenando e orientando a equipe. Além disso, ele possui a função muito importante de fazer a conexão entre a estratégia da empresa e as operações do departamento.

Os promotores de venda são responsáveis por fazer contato com os clientes e negociar o preço, quantidade e tipos de produtos para vender. Eles recebem treinamento em negócios, sobre a estratégia da empresa, sobre os produtos fabricados, entre outros. Os promotores atuam constantemente fora do escritório, se deslocando diariamente para realizar reuniões com os clientes. Alguns promotores de venda são coordenadores de regiões (bairros da cidade) e atuam como assistentes do gerente, gerindo e coordenando os promotores da respectiva região.

Este departamento é capacitado para tomar ações corretivas em caso de falha no sistema de gestão de segurança dos alimentos. As ações corretivas relacionadas à equipe de vendas e expedição são de entrar em contato com os clientes (canais de distribuição) para informar os mesmos que se deve realizar um *recall* dos produtos e organizar toda a frota de logística para efetuar o recolhimento.

## **III.4 Instalações e edificações**

O escritório central e planta industrial da Nápoles estão situados no bairro de Benfica, pertencente à cidade do Rio de Janeiro (RJ), Brasil. A planta industrial possui uma área aproximada de 2000 m<sup>2</sup>.

A fábrica tem dois andares, o primeiro andar com produção de massa de pastel (Setor Pastel) e produção de ravióli, capelete, talharim, pastel recheado e lasanha (Setor Massas). O segundo andar contempla o Setor Pizza e o Setor de Recheios, onde são preparados os



recheios do pastel, os recheios dos produtos de capelete, ravióli e fagotini e é feita a montagem da pizza semi-pronta. Há também no segundo andar um refeitório e um galpão.

A fábrica está localizada em área mista (residencial e industrial), com entrada por uma rua pavimentada e arborizada. A fábrica se encontra conectada com o sistema de esgoto e distribuição de água do município do Rio de Janeiro e também recebe o serviço municipal de recolhimento de lixo urbano.

### **III.5 Processo de produção de ravióli, capelete, pastel recheado, fagotini e nhoque**

Nesta seção são apresentados cinco fluxogramas de processos existentes na planta industrial da Nápoles. São eles:

- Processo 01: Recebimento e Estocagem de Matérias-Primas e Insumos;
- Processo 03: Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque;
- Processo 07: Acondicionamento em Frigorífico e Expedição;
- Processo 08: Preparo dos Recheios;
- Processo 09: Farinha de Rosca;
- Processo 10: Água de Processo.

O Processo 03 é o único da lista acima em que há a confecção de um produto propriamente dito. Este processo foi selecionado dentre os demais processos dos outros produtos da Nápoles para que fosse possível realizar uma análise prévia dos perigos detalhada e verificar a possibilidade de se classificar alguma etapa do processo como um PCC, podendo-se então realizar o estudo de confiabilidade. O Processo 03 foi escolhido por possuir uma etapa de pasteurização, sendo esta uma forte candidata para ser classificada como um PCC.

Os outros processos também descritos nesta seção são utilidades da planta industrial. Estes processos fornecem matéria-prima (Processo 01), água (Processo 10) e produtos intermediários (Processo 08 e 09) para os processos produtivos da indústria. Em particular, o Processo 07 é responsável pelo acondicionamento dos produtos produzidos em temperatura de refrigeração para posteriormente serem distribuídos aos clientes.

A numeração dos processos não é seqüencial porque, como dito anteriormente, há outros processos na fábrica, os quais em conjunto com os descritos aqui receberam numeração seqüencial.



### III.5.1 Processo 01: Recebimento e Estocagem de Matérias-primas e Insumos

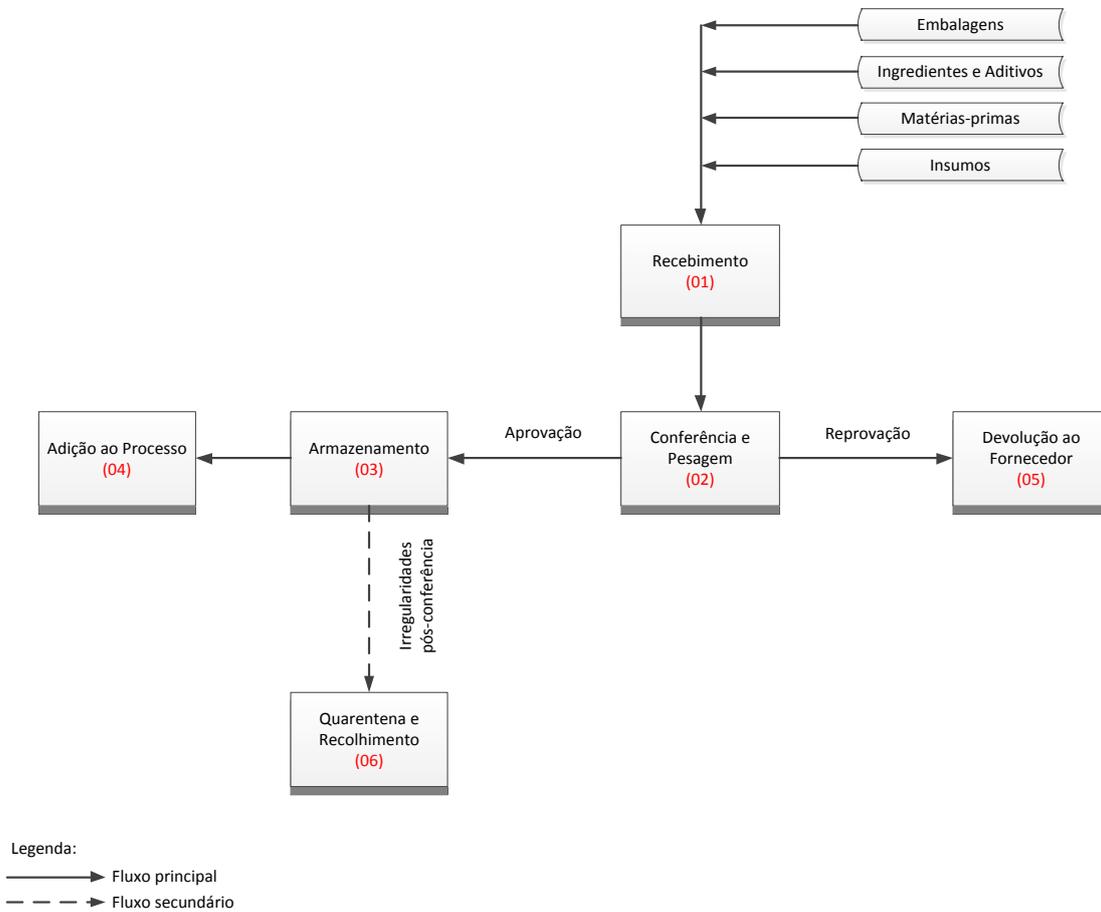


Figura 12 – Fluxograma do Recebimento e Estocagem de Matérias-primas e Insumos.



Quadro 1 – Memorial Descritivo das etapas do Recebimento e Estocagem de Matérias-primas e Insumos.

#	Etapa	Descrição
01	Recebimento	<p>No ato do recebimento, é observada a data de fabricação e validade do produto, e é registrada a temperatura dos produtos frios, estes devendo cumprir os seguintes critérios de temperatura (Referência: POP-10):</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Congelados: -18°C com tolerância até -12°C;</li><li>• Resfriados: 6 a 10°C, ou conforme a especificação do fabricante;</li><li>• Refrigerados: até 6°C com tolerância de 7°C.</li></ul> <p>Os produtos são pesados, e levados para conferência da rotulagem (Etapa 02).</p> <p>Os entregadores são avaliados devendo estes estar com uniforme adequado e limpo, sapato fechado, proteção para o cabelo ou mãos quando necessário (Referência: Manual de BPF).</p>
02	Conferência e Pesagem	<p>É conferida a rotulagem dos produtos verificando nome e composição, lote, data de fabricação e validade, número de registro no órgão oficial, CGC, endereço do fabricante e distribuidor, condições de armazenamento e quantidade (peso).</p> <p>Recolhimento do laudo laboratorial para leitura, verificando, se o mesmo mantém o padrão de identidade e qualidade exigido pela empresa.</p> <p>É feita a análise sensorial das matérias-primas, insumos e ingredientes.</p> <p>No caso de embalagens, estas são enviadas ao Laboratório de Controle de Qualidade, onde serão analisados todos os parâmetros pertinentes.</p> <p>Se as especificações exigidas forem atendidas, o produto é enviado para o almoxarifado (Etapa 03). Em caso negativo, o mesmo será devolvido ao fornecedor (Etapa 05).</p> <p>(Referência: POP-10)</p>
03	Armazenamento	<p>As matérias-primas, ingredientes e insumos aprovados são armazenados no almoxarifado, de acordo com as Boas Práticas de Fabricação.</p> <p>(Referência: Manual de BPF).</p>
04	Adição ao Processo	<p>Cada matéria-prima, ingrediente ou insumo é enviado para seus respectivos setores da planta industrial para serem adicionados ao processo, de acordo com a demanda de produção.</p>
05	Devolução ao Fornecedor	<p>Se quaisquer produtos fornecidos não atenderem as especificações exigidas, o produto é devolvido, junto ao comunicado de reprovação do mesmo. Se houver repetição da irregularidade, entra-se com pedido de outro fornecedor já cadastrado na empresa.</p> <p>(Referência: POP-10)</p>
06	Quarentena e Recolhimento	<p>Caso a primeira avaliação do produto tenha sido falha e sendo constatadas irregularidades posteriormente ao recebimento, o produto é identificado através de etiquetas e guardado no almoxarifado até seu recolhimento.</p> <p>(Referência: POP-10)</p>

### III.5.2 Processo 03: Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque

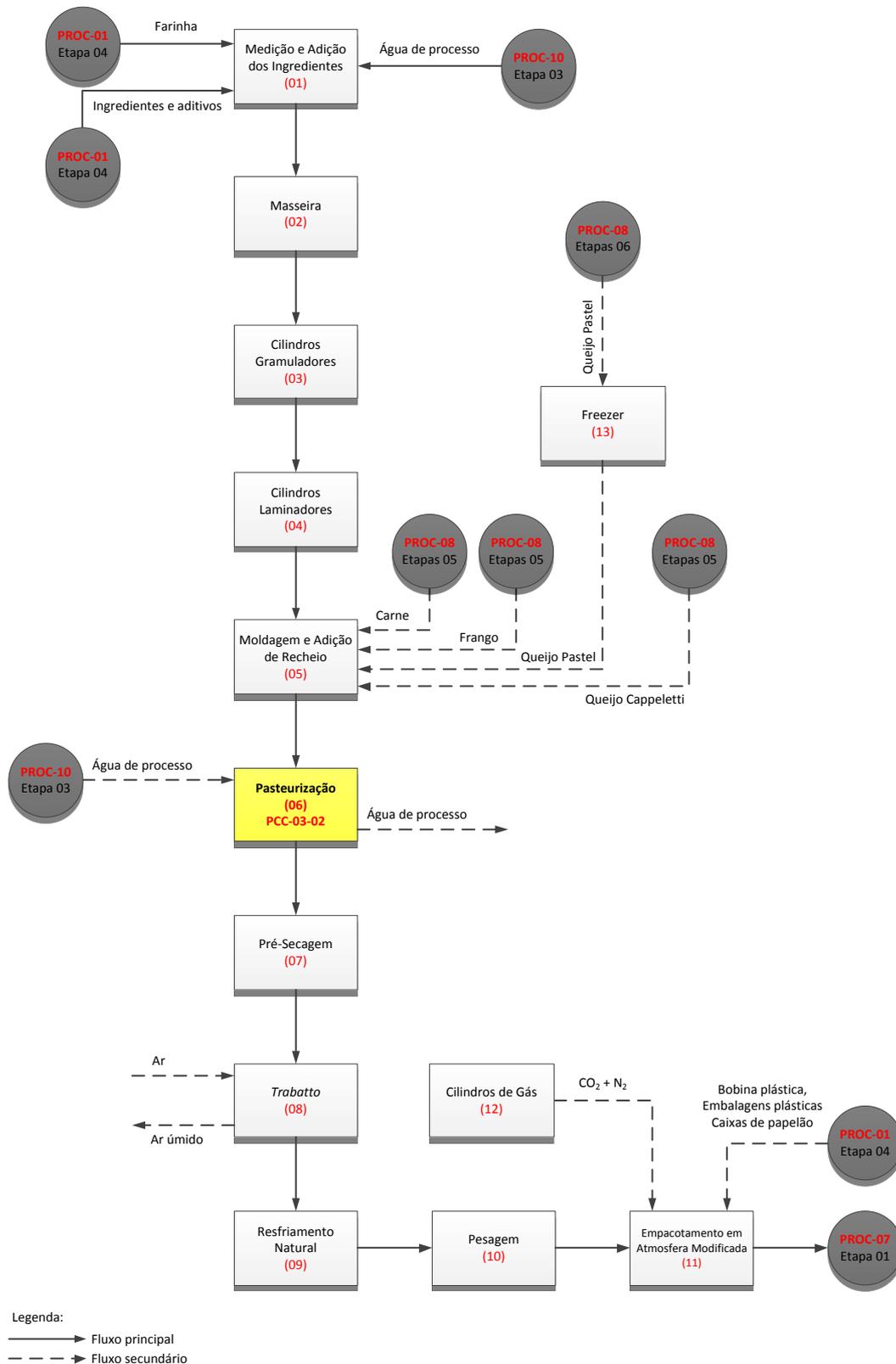


Figura 13 – Fluxograma da produção de Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque.



Quadro 2 – Memorial Descritivo da produção de Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque.

#	Etapa	Descrição
01	Medição e Adição dos Ingredientes	<p>Os ingredientes e aditivos são adicionados à masseira (<b>Etapa 02</b>) pelo auxílio de manipuladores. Os ingredientes adicionados são:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Ravióli, Capeleti e Fagotini: Farinha de trigo, Água, Sal e Corante natural de urucum;</li><li>• Nhoque: Farinha de trigo, Água, Sal, Corante natural de urucum, Ovos, Conservante Sorbato de Potássio (INS 202) e Acidulante Ácido Lático (INS 270);</li><li>• Pastel Recheado: Farinha de trigo, Água, Gordura de Palma, Sal e Conservante Sorbato de Potássio (INS 202).</li></ul> <p>A quantidade dos ingredientes e aditivos adicionados é padronizada por canecas volumétricas ou pela quantidade total presente nas embalagens.</p>
02	Masseira	<p>Os ingredientes e aditivos são misturados na masseira de operação contínua. Toda a linha de produção é contínua, mas esta opera em lotes ou bateladas. O bolo de massa obtido, pela ação da gravidade, alimenta os cilindros gramuladores (<b>Etapa 03</b>) para elaboração do tapete de massa.</p>
03	Cilindros Gramuladores	<p>Os cilindros gramuladores são responsáveis pela formação do tapete de massa. Estes são compostos por dois cilindros fresados (não pontiagudos) mais outro cilindro liso, dispostos em uma configuração V, onde os vértices do topo são compostos pelo par de cilindros fresados e o de baixo pelo cilindro liso. A gramulação ocorre da seguinte maneira:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Os cilindros fresados giram em sentidos opostos e se encontram a uma distância específica. O bolo de massa é obrigado a passar por esta abertura, realizando-se uma compactação da massa (gramulação) e obtendo-se o tapete de massa;</li><li>• O cilindro liso abaixo, que possui diâmetro superior, gira em sentido horário e sua superfície é muito próxima das paredes do equipamento. O tapete de massa é obrigado a passar por esta abertura, realizando-se uma compactação mais forte do que a anterior. Devido à fricção entre as superfícies e a massa, esta é aquecida pela dissipação de calor. Esta é uma operação onde ocorrem fenômenos semelhantes à extrusão.</li></ul> <p>O tapete de massa formado sofre uma laminação pela presença de um cilindro no fundo do equipamento. O tapete de massa laminado é transportado por uma correia transportadora com 45° de inclinação para cima com a horizontal.</p>

Quadro 2 – Memorial Descritivo da produção de Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque.  
(continuação)

#	Etapa	Descrição
04	Cilindros Laminadores	<p>Os cilindros laminadores possuem a função de reduzir a espessura do tapete de massa até a espessura ideal para o processamento posterior e para a comercialização. O tapete de massa oriundo da gramulação continua seu transporte pelo auxílio de cilindros rolantes espaçados por determinada distância, conforme a figura abaixo.</p> <p>O tapete de massa é transferido da correia seguindo um fluxo vertical para baixo depois um fluxo horizontal com leve inclinação para cima, indo de encontro ao primeiro cilindro rolante. Esta direção de fluxo é promovida por uma haste, conforme a figura abaixo.</p> <p>Após o transporte pelos cilindros rolantes, o tapete de massa sofre a laminação por um par de cilindros de superfícies lisas, onde estes estão dispostos verticalmente por uma distância específica. O tapete de massa é obrigado a passar por esta abertura, realizando-se a redução da espessura do mesmo.</p> 
05	Moldagem e Adição de Recheio	<p>Dependendo do tipo de produto sendo fabricado, é utilizada uma moldadora específica para cada tipo de produto: Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque.</p> <p>Estas moldadoras são móveis e são regularmente substituídas para que seja possível utilizar a mesma linha de produção para fabricar a variedade de produtos mencionada anteriormente.</p> <p>As moldadoras operam cortando o tapete de massa e simultaneamente adicionam o recheio específico e moldam a massa cortada, gerando o produto específico. Os recheios adicionados podem ser de carne, frango ou queijo (<a href="#">Referência: Processo 08</a>).</p>



Quadro 2 – Memorial Descritivo da produção de Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque.  
(continuação)

#	Etapa	Descrição
06	Pasteurização <b>PCC-03-02</b>	<p>A operação de pasteurização é realizada para promover o cozimento do produto, além de reduzir a carga microbiana presente no produto e aumentar a vida de prateleira do mesmo.</p> <p>O pasteurizador utiliza vapor d'água por contato direto para promover o aquecimento e cozimento do produto. O vapor d'água é gerado por uma caldeira elétrica (4 resistores) a partir de água de processo. A temperatura de operação é de 85-95 °C por 4,5 min.</p> <p>O produto segue o fluxo da linha de produção pelo auxílio de correias transportadoras. A velocidade de fluxo determina o tempo de residência do produto sob o processo de pasteurização.</p>
07	Pré-Secagem	<p>O produto segue o fluxo da linha de produção pelo auxílio de uma correia transportadora. A velocidade de fluxo da correia determina o tempo de residência sob o processo de secagem e a quantidade de umidade reduzida.</p> <p>A umidade do produto é reduzida pela ventilação forçada de ar, por auxílio de ventiladores, efetuada perpendicularmente sobre o produto. Ar ambiente é aspirado pelos ventiladores para promover a convecção forçada.</p> <p>Esta operação de secagem possui a função de realizar uma remoção da umidade da superfície do produto, onde o mesmo sofrerá uma redução maior de umidade no <i>Trabatto</i> (Etapa 08).</p>
08	<i>Trabatto</i>	<p>Este equipamento promove a secagem do produto pela ventilação forçada de ar quente por um determinado tempo de residência. Ar ambiente é aspirado pelo equipamento e aquecido por resistores elétricos.</p> <p>O <i>Trabatto</i> possui várias chapas metálicas dispostas uma sobre a outra, a uma distância determinada, e com uma ligeira inclinação para baixo. O comprimento destas chapas é tal que há um vão entre a extremidade da chapa e a parede do equipamento, que permite a queda do produto para a chapa inferior.</p> <p>O produto segue o fluxo do processo pelo movimento mecânico oscilatório vertical das chapas metálicas, onde o produto é sacudido constantemente (realizando saltos para frente) para promover mais contato com o ar quente. O número de chapas metálicas e o comprimento das mesmas determinam o tempo de residência do produto sob o processo de secagem.</p> <p>As chapas são intercaladas quanto à localização dos vãos, isto é, quando uma chapa possui um vão na extremidade direita, a chapa inferior terá seu vão na extremidade esquerda e vice-versa. Ao cair na chapa inferior, o produto segue o fluxo do processo em direção oposta, sempre intercalando o fluxo ao trocar de chapa (fluxo em “zigue-zague”).</p> <p>As chapas se encontram livres da estrutura do equipamento, isto é, estas não são soldadas com as paredes do equipamento permitindo livre movimento, mas não sendo possível a queda do produto, a não ser pelo vão.</p>



Quadro 2 – Memorial Descritivo da produção de Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque.  
(continuação)

#	Etapa	Descrição
09	Resfriamento Natural	<p>Antes de o produto ser enviado para a Pesagem (Etapa 10), há uma seção da linha de produção com dado comprimento onde ocorre um resfriamento natural e gradual do produto. Este resfriamento é promovido pelo repouso dos mesmos (que saíram do <i>Trabatto</i>) em contato com o ar ambiente, que possui temperatura inferior.</p> <p>O comprimento desta seção final da linha de produção juntamente com a velocidade da correia transportadora determina o tempo de residência do produto submetido ao resfriamento.</p> <p>Esta etapa tem como objetivo reduzir a temperatura de empacotamento do produto para evitar a formação de condensado dentro da embalagem após o empacotamento (Etapa 10).</p>
10	Pesagem	<p>A quantidade de produto a ser empacotada é padronizada pelo auxílio de uma balança eletrônica presente na linha de produção.</p>
11	Empacotamento em Atmosfera Modificada	<p>A quantidade de produto após a pesagem é transferida para os recipientes de embalagens plásticas termoformadas, por auxílio de manipuladores. Em seguida, a embalagem com o produto entra na câmara de vácuo, onde se remove o ar e injeta-se o gás de atmosfera modificada. O final da operação é dado pelo envase por ação térmica com filme plástico sobre o topo do recipiente.</p> <p>As embalagens passam por um datador a laser, onde se coloca a data de fabricação, o número do lote e a data de validade do produto.</p> <p>Após empacotamento, o produto final embalado é encaixotado em caixas de papelão e enviado para o Frigorífico (Processo 07) para conservação em temperatura de refrigeração.</p>
12	Cilindros de Gás	<p>O gás de atmosfera modificada (MAPAX®) fica armazenado em cilindros de gás enviados pelo fornecedor. Este gás é composto por 50% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e 50% de nitrogênio (N<sub>2</sub>). O bocal dos cilindros é alinhado com a empacotadora (Etapa 11).</p> <p>À medida que se consome os gases, a pressão medida pelo manômetro dos cilindros decresce. Quando a pressão dos cilindros atinge um limite mínimo, isto indica que os mesmos devem ser trocados e devolvidos ao fornecedor para preencher novamente os cilindros com gás.</p>
13	Freezer	<p>O recheio de queijo para Pastel Recheado utilizado na moldadora (Etapa 05) é armazenado em freezer localizado no próprio Setor de Massas. Sacos plásticos contendo o recheio de queijo empacotado são regularmente enviados da produção de recheios para este freezer. Os demais recheios vêm diretamente da Sala de Recheio.</p> <p>(Referência: Processo 08)</p>

### III.5.3 Processo 07: Acondicionamento em Frigorífico e Expedição

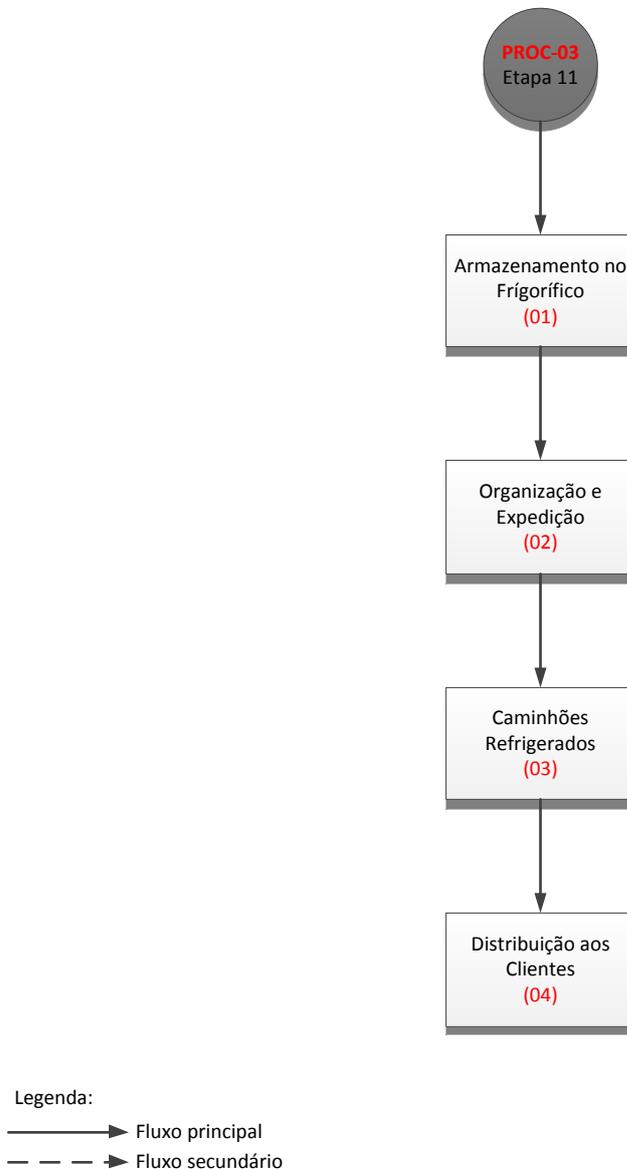


Figura 14 – Fluxograma do Acondicionamento em Frigorífico e Expedição.



Quadro 3 – Memorial Descritivo do Acondicionamento em Frigorífico e Expedição.

#	Etapa	Descrição
01	Armazenamento em Frigorífico	<p>Os caixotes dos produtos dos diversos setores da planta industrial são enviados ao frigorífico para armazenamento em temperatura de refrigeração entre 4°C e 10°C.</p> <p>O armazenamento em refrigeração é necessário para promover a conservação dos produtos e o frigorífico atua também como um pulmão para os caminhões refrigerados (Etapa 03), que realizarão a expedição dos produtos para os clientes.</p>
02	Organização e Expedição	<p>Os caixotes dos produtos são organizados dentro do frigorífico de acordo com o sistema FIFO (<i>First In First Out</i>) e também de acordo com o tipo de produto, prazos de entrega para os clientes e data de fabricação.</p>
03	Caminhões Refrigerados	<p>A equipe de expedição é responsável pela organização da quantidade e do tipo de produtos que serão postos nos caminhões refrigerados de uma determinada rota de entrega. Sendo assim, os devidos caixotes com determinados produtos são transferidos por manipuladores para os caminhões refrigerados no momento em que este chega à indústria.</p> <p>A temperatura de refrigeração interna dos caminhões está entre 4 °C e 10 °C.</p>
04	Distribuição aos Clientes	<p>Os caminhões refrigerados seguem as diversas rotas planejadas pela equipe de expedição para distribuição dos produtos para os clientes.</p>

### III.5.4 Processo 08: Preparo dos Recheios

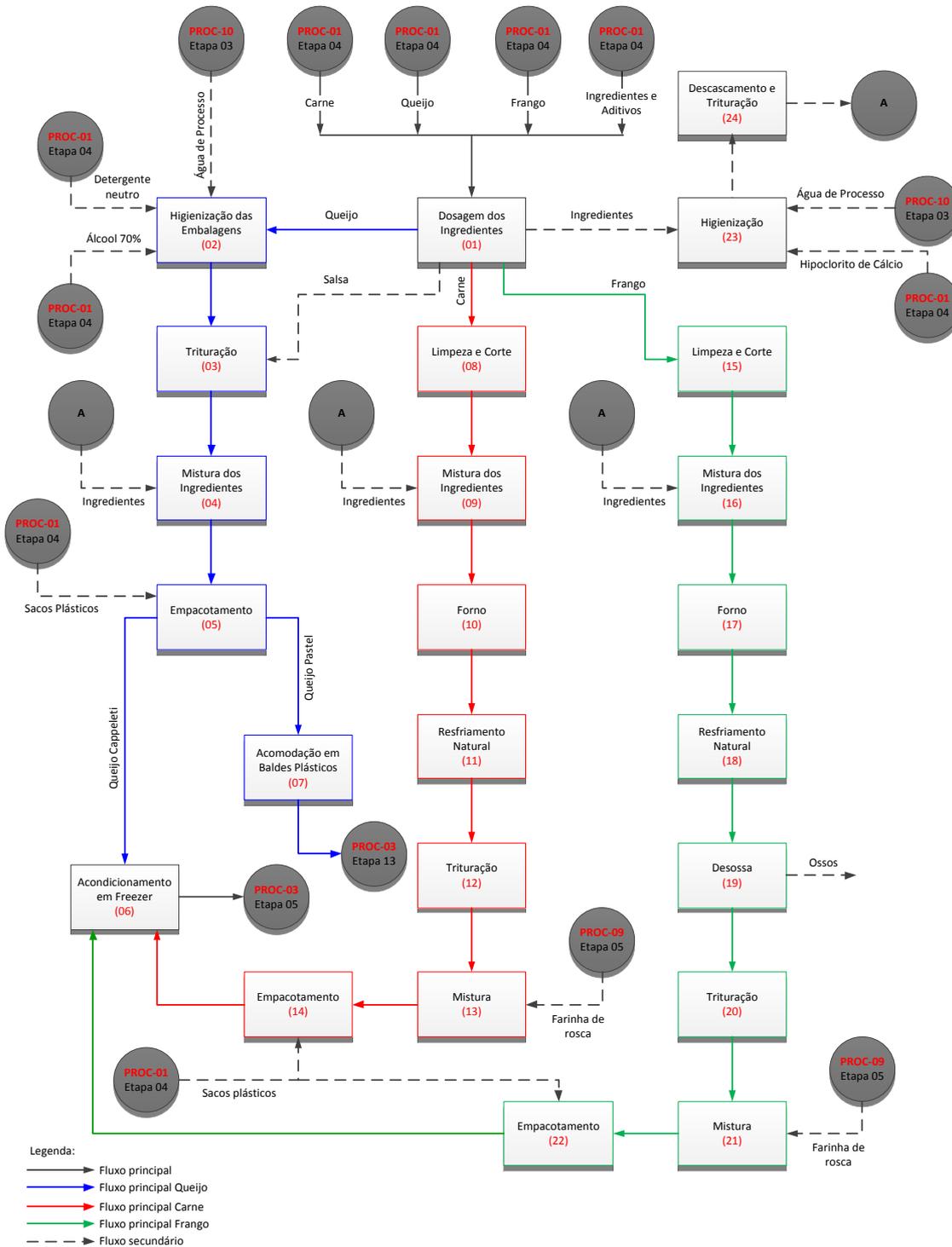


Figura 15 – Fluxograma do Preparo dos Recheios.



Quadro 4 – Memorial Descritivo do Preparo dos Recheios.

#	Etapa	Descrição
01	Dosagem dos Ingredientes	<p>O ingrediente principal (carne, queijo ou frango) e os ingredientes e aditivos são dosados para obtenção da formulação dos recheios que serão utilizados no Setor de Massas. A quantidade dosada de ingrediente principal e dos ingredientes e aditivos é padronizada por canecas volumétricas ou pela quantidade total presente nas embalagens. Os ingredientes e aditivos são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Recheio de Carne: Cebola, Cenoura, Aipo, Alho, Cravo, Gordura de Palma, Vinho tinto, Louro, Pimenta do Reino, Conservante Sorbato de potássio (INS 202), Realçador de sabor Glutamato Monossódico;</li> <li>• Recheio de Frango: Cebola, Cenoura, Aipo, Alho, Cravo, Gordura de Palma, Alecrim, Louro, Pimenta do Reino, Conservante Sorbato de potássio (INS 202), Realçador de sabor Glutamato Monossódico;</li> <li>• Recheio de Queijo: Cebola, Cenoura, Aipo, Alho, Cravo, Gordura de Palma, Salsa desidratada, Pimenta do Reino, Conservante Sorbato de potássio (INS 202), Realçador de sabor Glutamato Monossódico e Aroma natural de queijo.</li> </ul>
02	Higienização das Embalagens	<p>As embalagens de queijo são higienizadas em banheiras plásticas, onde são lavadas com detergente neutro, enxaguadas com água de processo e sanitizadas com álcool 70%.</p> <p>Esta operação é realizada com o intuito de evitar a contaminação da mão dos manipuladores quando forem abrir as embalagens e posteriormente manipularem o queijo.</p>
03	Trituração	<p>O queijo é inserido em um triturador utilizado em cozinhas, pelo auxílio de manipuladores, para formação de pedaços menores com intuito de formar a matriz do recheio.</p>
04	Mistura dos Ingredientes	<p>Os ingredientes higienizados, descascados e triturados são misturados ao queijo para elaboração do recheio de queijo final. Esta operação é realizada por manipuladores com o auxílio de ferramentas de cozinha.</p>
05	Empacotamento	<p>O recheio de queijo final é transferido para as embalagens de sacos plásticos, que é selada a vácuo. As embalagens são então pesadas e etiquetadas com as informações de data de fabricação e peso.</p>
06	Acondicionamento em Freezer	<p>Os recheios produzidos na Sala de Recheios são armazenados em freezer, entre -14°C e -5°C. De acordo com a demanda de produção, os sacos plásticos contendo os recheios são enviados para o Setor de Massas. (Processo 08)</p>



Quadro 4 – Memorial Descritivo do Preparo dos Recheios. (continuação)

#	Etapa	Descrição
07	Acomodação em Baldes Plásticos	O recheio de queijo utilizado para Pastel Recheado é transferido para baldes plásticos e enviado para armazenamento em freezer localizado no Setor de Massas ( <b>Processo 08</b> ), entre -14°C e -5°C. Isto ocorre, pois a demanda de produção de Pastel Recheado é muito maior do que a dos outros produtos, com isso há um freezer no próprio Setor de Massas específico para armazenar o recheio deste produto.
08	Limpeza e Corte	A carne é previamente enxaguada com água de processo e é removida a gordura por manipuladores. Posteriormente, a carne é cortada em pedaços menores por manipuladores com o auxílio de facas.
09	Mistura dos Ingredientes	Os ingredientes higienizados, descascados e triturados são misturados à carne para elaboração do recheio de carne. Esta operação é realizada por manipuladores com o auxílio de utensílios de cozinha.
10	Forno	Os pedaços de carne são postos em bandejas pelos manipuladores e são assados para obtenção do sabor e aroma característicos. Inerente a esta operação, há uma redução da carga microbiana pela aplicação de calor e remoção da umidade.
11	Resfriamento Natural	Após serem assados, os pedaços de carne nas bandejas são retirados do forno e deixados em repouso para que a temperatura dos pedaços atinja um valor que possibilite o contato manual dos manipuladores, com o intuito de tornar possível a manipulação posterior.
12	Trituração	Os pedaços de carne são inseridos em um triturador utilizado em cozinhas, pelo auxílio de manipuladores, para redução de tamanho com intuito de formar a matriz do recheio.
13	Mistura	A farinha de rosca é adicionada a matriz do recheio com o intuito de aumentar o rendimento do processo e obter o recheio de carne final.
14	Empacotamento	O recheio de carne final é transferido para as embalagens de sacos plásticos, que é selada a vácuo. As embalagens são então pesadas e etiquetadas com as informações de data de fabricação e peso. Em seguida são enviadas para acondicionamento no freezer da sala. ( <b>Etapa 06</b> )
15	Limpeza e Corte	O frango é previamente enxaguado com água de processo. Posteriormente, o frango é cortado em pedaços menores por manipuladores com o auxílio de facas.
16	Mistura dos Ingredientes	Os ingredientes higienizados, descascados e triturados são misturados ao frango para elaboração do recheio de frango. Esta operação é realizada por manipuladores com o auxílio de ferramentas de cozinha.
17	Forno	Os pedaços de frango são postos em bandejas pelos manipuladores e são assados para obtenção do sabor e aroma característicos. Inerente a esta operação, há uma redução da carga microbiana pela aplicação de calor e remoção da umidade.



Quadro 4 – Memorial Descritivo do Preparo dos Recheios. (continuação)

#	Etapa	Descrição
18	Resfriamento Natural	Após serem assados, os pedaços de carne nas badejas são retirados do forno e deixados em repouso para que a temperatura dos pedaços atinja um valor que possibilite o contato manual dos manipuladores, com o intuito de tornar possível a manipulação posterior.
19	Desossa	Os ossos do frango são removidos manualmente por manipuladores e serão posteriormente moídos para serem devidamente descartados.
20	Trituração	Os pedaços de frango desossados são inseridos em um triturador utilizado em cozinhas, pelo auxílio de manipuladores, para redução de tamanho com intuito de formar a matriz do recheio.
21	Mistura	A farinha de rosca é adicionada a matriz do recheio com o intuito de aumentar o rendimento do processo e obter o recheio de frango final.
22	Empacotamento	O recheio de frango final é transferido para as embalagens de sacos plásticos, que é selada a vácuo. As embalagens são então pesadas e etiquetadas com as informações de data de fabricação e peso. Em seguida são enviadas para acondicionamento no freezer da sala. (Etapa 06)
23	Higienização	Os ingredientes utilizados nos recheios (legumes e hortaliças) são enxaguados com água de processo para remoção de sujidades e posteriormente imersos em solução de hipoclorito de cálcio 200 ppm por 15 minutos para sanitização. Toda a operação é realizada por manipuladores.
24	Descascamento e Trituração	Os ingredientes higienizados utilizados nos recheios (legumes e hortaliças) são descascados manualmente por manipuladores e inseridos em um triturador utilizado em cozinhas, para redução de tamanho com intuito de facilitar a homogeneização na matriz de recheio.

### III.5.5 Processo 09: Farinha de Rosca

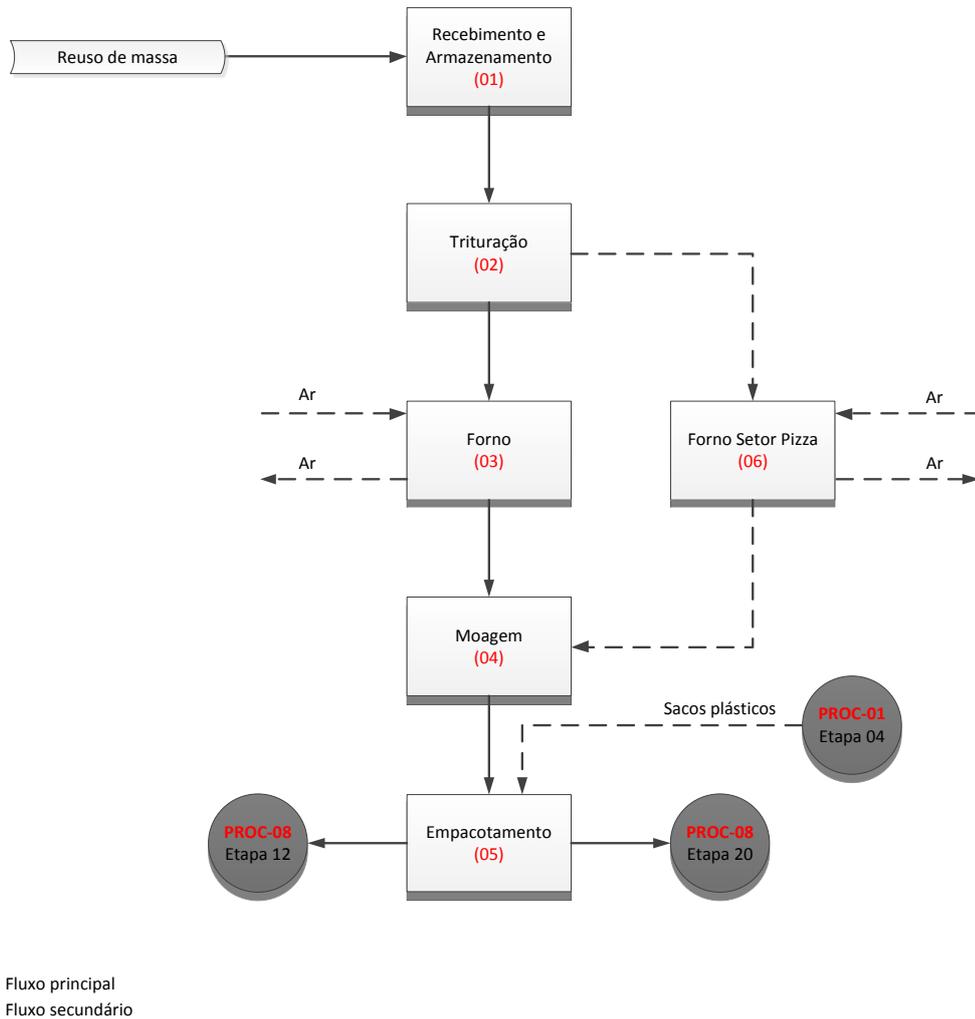


Figura 16 – Fluxograma da produção de Farinha de Rosca.



Quadro 5 – Memorial Descritivo da produção de Farinha de Rosca.

#	Etapa	Descrição
01	Recebimento e Armazenamento	Os discos de pizza com defeito e oriundos do cesto inferior após o Forno da fabricação de Pizza ( <b>Processo 02</b> ), são recebidos do Setor Pizza e armazenados em cestos plásticos, na Sala de Recheio, para posterior processamento. Toda esta operação é realizada por manipuladores.
02	Trituração	Os discos de pizza são inseridos em um triturador utilizado em cozinhas, pelo auxílio de manipuladores, para formação de pedaços menores. Esta operação é feita para que os pedaços sejam mais facilmente assados no Forno ( <b>Etapa 03 ou Etapa 06</b> ).
03	Forno	Os pedaços triturados são postos em bandejas pelo auxílio de manipuladores e são assados em forno industrial.
04	Moagem	Os pedaços assados são transferidos ao moedor por manipuladores, onde ocorre a redução do tamanho e a obtenção de farinha de rosca. A granulometria da farinha de rosca obtida depende do tempo de operação a que os pedaços foram submetidos.
05	Empacotamento	A farinha de rosca obtida é transferida para sacos plásticos para empacotamento e acondicionada em estantes, na temperatura ambiente. A farinha de rosca será utilizada posteriormente como ingrediente na formulação dos recheios utilizados nos diversos setores da planta industrial. ( <b>Referência: Processo 08</b> )
06	Forno Setor Pizza	Dependendo da quantidade de discos de pizza encaminhados para a produção de farinha de rosca e também se o Setor Pizza acabou recentemente a sua produção, aproveita-se o forno deste setor para assar os pedaços triturados. O aproveitamento se dá devido ao calor remanescente no interior do forno, que continua a existir por um período de tempo razoável, mesmo após desligar os resistores elétricos do equipamento.

### III.5.6 Processo 10: Água de Processo

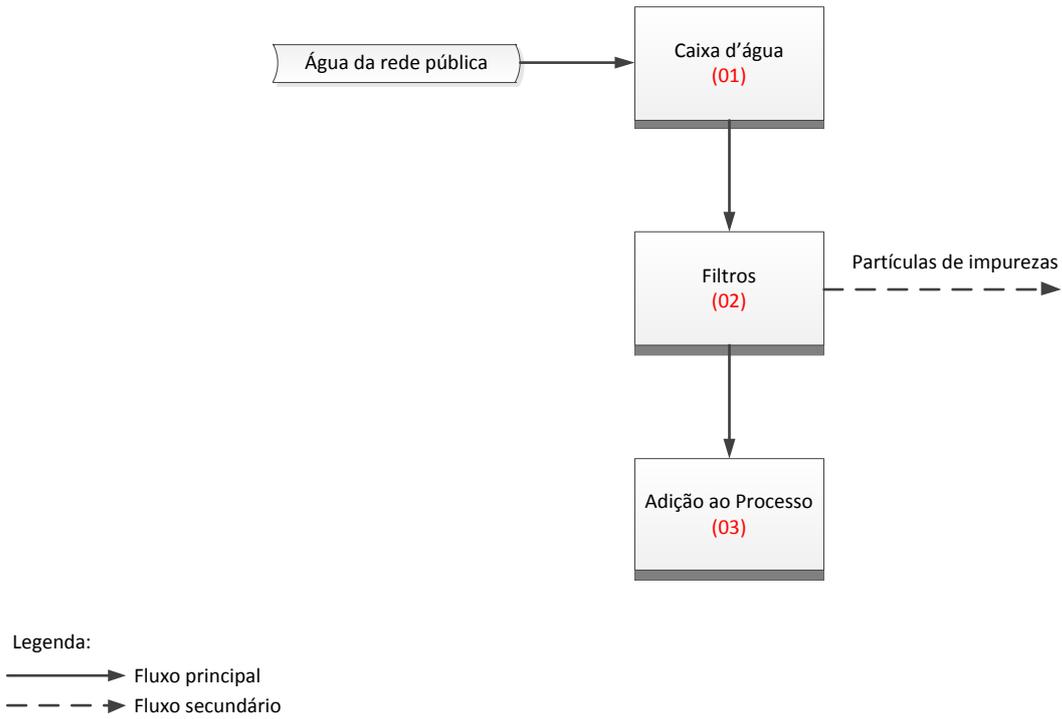


Figura 17 – Fluxograma da produção de Água de Processo.



Quadro 6 – Memorial Descritivo da produção de Água de Processo.

#	Etapa	Descrição
01	Caixa d'água	<p>Água da rede pública é adicionada e armazenada na caixa d' água da planta industrial. A caixa d' água é comum para toda à indústria, inclusive aos banheiros, refeitório, etc.</p> <p>A caixa d' água é regularmente limpa a cada seis meses para assegurar os padrões de qualidade e segurança da água (Referência: POP-1).</p>
02	Filtros	<p>A remoção de partículas em suspensão na água é realizada por dois filtros do tipo bolsa em série para assegurar os padrões de qualidade e segurança da água.</p>
03	Adição ao Processo	<p>A água é utilizada nos diversos setores da planta industrial, pelo auxílio de tubulações e torneiras, para ser adicionada ao processo, de acordo com a demanda de produção.</p> <p>Regularmente são realizadas análises para controle de potabilidade da água, com o objetivo de verificar se os padrões de qualidade e segurança estão sendo cumpridos (Referência: POP-1).</p>



## CAPÍTULO IV. ANÁLISE PRÉVIA DOS PERIGOS

Devido à ausência de um plano HACCP, uma análise prévia de perigos potenciais existentes no Processo 03 (Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque) da planta industrial da Nápoles foi realizada para se ter conhecimento sobre quais etapas poderiam ser classificadas como PCCs e ser possível dar andamento ao estudo de confiabilidade.

Para que seja possível efetuar este estudo prévio de perigos, deve-se primeiramente definir e identificar quais são os perigos existentes (físicos, químicos e biológicos) à saúde dos consumidores no processo.

### IV.1 Perigos físicos

O perigo físico em alimentos inclui uma variedade de materiais, referidos por vezes como “materiais estranhos”, “objetos estranhos”, “corpos estranhos”, “sujeiras” ou “impurezas”. Os perigos físicos podem decorrer principalmente das matérias-primas e insumos, dos equipamentos e da linha de produção, da quebra de materiais vítreos, dos manipuladores e dos vetores e pragas<sup>[6],[11],[12]</sup>.

Perigos físicos podem ser definidos como corpos estranhos em níveis e dimensões inaceitáveis capazes de, fisicamente, causar danos a um consumidor. “Corpo estranho” é algum elemento sólido, que possui consistência e que não é próprio do alimento. As injúrias que os perigos físicos podem causar são: A quebra de dentes, cortes na língua e na boca, sufocamento, engasgamento, perfuração intestinal e outras<sup>[12]</sup>.

Alguns exemplos de perigos físicos que podem ser encontrados em produtos acabados incluem fragmentos de metal (pregos, facas, partes de equipamentos, fio, adorno, etc.), pedaços de vidro (pedaços de jarras, garrafas, lâmpadas, termômetros, janelas, visores, etc.), pedaços de madeira (pallets quebrados, quadros, etc.), pedaços de plástico (de material de embalagem, luvas, etc.), fragmentos de osso (do corte de carcaças) e outros materiais estranhos (canetas, pedras, lixo, etc.)<sup>[6],[11],[12]</sup>.



De uma maneira geral, os perigos físicos podem ser subdivididos em quatro classes<sup>[6],[11]</sup>:

- Partículas maiores que 7 mm (maior severidade);
- Partículas menores que 7 mm (severidade média);
- Partículas pontiagudas (severidade média);
- Material estranho abrasivo (menor severidade).

Os perigos decorrentes de equipamentos, da linha de produção e da quebra de materiais vítreos (no caso, lâmpadas) são os mais relevantes na planta industrial da Nápoles. A ruptura de lâmpadas ocasiona a projeção de partículas de vidro para o alimento sendo processado. A queda de elementos de máquinas ou partes de equipamentos são perigos que podem ocorrer devido ao desgaste ou ruptura destes. Alguns exemplos de perigos oriundos de equipamentos são fragmentos de metal (pedaços de facas e utensílios de manipulação, fios, adornos, etc.), elementos de máquinas (pregos, parafusos, porcas, etc.), entre outros.

#### **IV.1.1 Barreiras existentes contra perigos físicos**

O risco da ruptura das lâmpadas e a consequente projeção de partículas de vidro são prevenidos pela adoção das medidas e ações definidas no manual de BPF da empresa. Estas medidas preventivas apresentam-se como efetivas no controle deste perigo, não sendo necessária a implantação de medidas de controle.

O risco da queda de elementos de máquinas ou partes de equipamentos devido ao desgaste ou ruptura são prevenidos pela realização das tarefas presentes no POP-8 – Manutenção preventiva e calibração de equipamentos. No entanto, estas medidas preventivas não se apresentam como efetivas no controle destes perigos, pois é verificada uma incidência, com frequência significativa, de elementos de máquinas ou fragmentos de metal durante a manutenção dos equipamentos. Com isso, torna-se necessária a implantação de uma medida de controle.

Uma recomendação seria a instalação de um equipamento detector de metais como uma última etapa (Detecção de Metais) do Processo 03. A descrição desta etapa se daria pela detecção de partículas metálicas de tamanho igual ou maior que 7 mm por um ou mais elementos de detecção, que acionaria(m) uma Função Instrumentada de Segurança (FIS) para a remoção do pacote embalado.



O objetivo desta etapa seria a redução a níveis mínimos da probabilidade da presença de partículas metálicas maiores que 7 mm no produto final, devido à possibilidade de ocasionar sufocamento, podendo levar a uma fatalidade, além de poder ocasionar quebra de dentes, ferimentos na boca, entre outros danos à saúde do consumidor.

## **IV.2 Perigos químicos**

Perigos químicos são contaminantes de natureza química, resíduos de produtos químicos ou produtos de sua degradação, toxinas produzidas por microrganismos ou algum componente tóxico ou alergênico natural do alimento, presentes em níveis inaceitáveis nos alimentos<sup>[13]</sup>.

A contaminação química dos alimentos pode ocorrer em qualquer momento de sua fabricação. Os efeitos dos contaminantes químicos ao consumidor podem acontecer a longo prazo (doenças crônicas), como os causados por produtos químicos cancerígenos e os produtos que são cumulativos, isto é, que vão sendo acumulados no organismo (como por exemplo as micotoxinas e alguns agrotóxicos). Os efeitos também podem acontecer a curto prazo (doenças agudas), como os produzidos por alergênicos que afetam as pessoas sensíveis causando reações que podem até ser fatais em questão de poucos minutos<sup>[13]</sup>.

### **IV.2.1 Barreiras existentes contra perigos químicos**

As principais fontes de perigos químicos existentes na planta industrial da Nápoles são:

- Adição excessiva de produtos químicos sanitizantes (quaternário de amônio e álcool 70%) durante as tarefas de higienização de equipamentos, linha de produção e respectivos elementos;
- Adição excessiva de produtos químicos sanitizantes (hipoclorito ou cloro residual livre) durante as etapas de higienização de matérias-primas – Higienização (Etapa 23, PROC-08).



- Produção de toxinas por bactérias devido à falha dos procedimentos de BPF e devido à falha de processos térmicos, com consequente sobrevivência e desenvolvimento de bactérias produtoras de toxinas durante o armazenamento do produto final– Pasteurização (Etapa 06, PROC-03);

O perigo de adição excessiva de quaternário de amônio ou álcool 70% durante a higienização de equipamentos é prevenido pela realização das tarefas presentes no POP-02 – Higienização das instalações, equipamentos, utensílios e arredores. Estas medidas preventivas apresentam-se como satisfatórias no controle deste perigo, não sendo necessária a implantação de medidas de controle.

Durante a etapa Higienização (no Processo 08 – Preparo dos Recheios), procedimentos operacionais, assim como a orientação e treinamento dos encarregados dos setores e do departamento de qualidade são medidas preventivas para que a adição de hipoclorito na solução lixiviadora não seja excessiva. Estas medidas também se apresentam como satisfatórias no controle deste perigo. A implantação de uma medida de controle não é então necessária.

A presença de toxinas produzidas por bactérias está associada ao desenvolvimento destas durante as etapas de processamento. Seu desenvolvimento devido a condições inadequadas de higiene (apesar de estas condições serem pouco frequentes) é pouco provável devido às características adversas (pH,  $A_a$ , etc.) ao crescimento destas bactérias, que os produtos intermediários possuem. Com isso, verifica-se um controle satisfatório deste perigo. Mais informações sobre como este controle é efetuado serão apresentadas na [Seção IV.3.1](#).

Por outro lado, para os produtos contendo recheio, a situação é diferente. Os produtos recheados sofrem processos térmicos, e a falha destes pode promover um cenário de risco, dado pela possibilidade do desenvolvimento de bactérias produtoras de toxinas no produto final. O controle deste perigo será discutido em maiores detalhes na [Seção IV.3.1](#).



### IV.3 Perigos biológicos

Perigos biológicos estão associados com organismos microbiológicos como as bactérias, vírus, fungos e parasitas<sup>[11],[14]</sup>.

A maioria das doenças de origem alimentar é causada por bactérias patogênicas. Vírus podem ser de origem alimentar/aquática ou podem ser transmitidos pelos humanos, animais ou outros tipos de vetores. Eles sobrevivem em células vivas, logo não podem se reproduzir nos alimentos, mas podem residir nestes. Parasitas possuem hospedeiros específicos, mas podem incluir humanos em seu ciclo de vida. Fungos incluem fungos filamentosos e leveduras<sup>[11]</sup>.

Os sintomas associados à veiculação de microrganismos patogênicos pela via alimentar na saúde dos consumidores vão desde enjoos e vômitos, desidratação por diarreia excessiva, sintomas neurológicos e, em alguns casos, pode levar a óbito<sup>[11],[14]</sup>.

Alguns microrganismos são capazes de produzir moléculas tóxicas (toxinas) ao ser humano. Alguns exemplos de bactérias são as espécies: *Clostridium botulinum* (produtor da toxina botulínica), *Clostridium perfringens* (produtor de exotoxinas), *Bacillus cereus* e *Staphylococcus coagulase positiva* (enterotoxinas). Alguns fungos são capazes de produzirem micotoxinas<sup>[14]</sup>.

As toxinas, classificadas como perigos químicos, podem ter efeitos a longo prazo ou a curto prazo, conforme discutido na [Seção IV.2](#). As toxinas podem ser termolábeis, isto é, são degradadas ou inativadas em temperaturas relativamente altas (acima de 60°C) ou termorresistentes<sup>[14]</sup>.

A concentração na qual um determinado microrganismo é capaz de promover danos à saúde dos consumidores varia para cada gênero e espécie. Os principais danos à saúde são caracterizados por gastroenterites. Por exemplo, alguns microrganismos (principalmente bactérias) são capazes de causar injúria ao ser humano em concentrações relativamente baixas, sendo estes microrganismos classificados como patogênicos. Os principais exemplos de bactérias patogênicas são as do gênero *Salmonella*, que já provocou surtos para concentrações de 100 células/100 g de alimento, e as linhagens de *Escherichia coli* enteropatogênica, que possuem facilidade de se aderirem à mucosa intestinal, provocando diarreias para concentrações muito baixas<sup>[14]</sup>.



Sendo assim, pode-se definir perigo biológico como a potencial contaminação do alimento por microrganismos, em níveis intoleráveis à saúde do consumidor, sendo este nível intolerável dependente de qual microrganismo está contaminando o alimento.

A taxa de crescimento dos microrganismos é variável e depende dos seguintes parâmetros listados no [Quadro 7](#). Com isso, uma barreira contra a contaminação por microrganismos, em níveis intoleráveis, é efetuar o prolongamento da fase lag ou fase de latência de crescimento. Esta fase é caracterizada pela adaptação dos microrganismos, durante a qual são produzidas enzimas necessárias ao metabolismo e praticamente não há reprodução celular<sup>[14]</sup>.

Na prática isto pode ser feito pela aplicação da *Tecnologia de Barreiras*, onde uma combinação destes fatores, em condições desfavoráveis ao crescimento dos microrganismos, é imposta aos alimentos<sup>[1],[14]</sup>.

Vale ressaltar que os parâmetros pH, atividade de água ( $A_w$ ) e potencial de oxirredução (Eh), dependendo da magnitude destes, podem atuar como barreiras com quase total eficiência no crescimento dos microrganismos. Parâmetros como a umidade relativa (UR), nutrientes disponíveis, temperatura de armazenamento, entre outros, atuam como barreiras que prolongam a fase lag, mas não impedem o crescimento dos microrganismos<sup>[14]</sup>.

Os microrganismos que conseguem se adaptar em uma ampla faixa de pH,  $A_w$ , quantidade de nutrientes, etc. são os fungos filamentosos, seguidos das leveduras e por último as bactérias. No entanto, em condições favoráveis ao crescimento de todos estes tipos de microrganismos, as bactérias são predominantes na população final por possuírem uma velocidade de reprodução muito mais rápida que os demais<sup>[14]</sup>.

De acordo com a temperatura ótima de crescimento dos microrganismos, costuma-se classificar estes em três grupos<sup>[14]</sup>:

- Psicrotróficos: Microrganismos que crescem bem abaixo de 7°C e possuem sua temperatura ótima de crescimento entre 20-30 °C;
- Mesófilos: Microrganismos que crescem bem entre 20-45 °C e possuem sua temperatura ótima de crescimento entre 30-40 °C;
- Termófilos: Microrganismos que crescem bem acima de 45 °C e possuem sua temperatura ótima de crescimento entre 55-65 °C.



Quadro 7 – Parâmetros intrínsecos e extrínsecos ao crescimento e funcionamento dos microrganismos nos alimentos. (Referência: [14]).

<b>Parâmetros Intrínsecos</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
pH	Um pH adverso afeta principalmente o funcionamento das enzimas e o transporte de nutrientes para o interior das células.
Umidade ( $A_a$ )	O efeito geral de diminuir a atividade de água ( $A_a$ ) a um valor abaixo do ótimo é aumentar a duração da fase lag de crescimento, onde a ausência de água influi diretamente nas atividades metabólicas do microrganismo.
Potencial de Oxirredução (Eh)	Microrganismos aeróbios necessitam de Eh positivos (oxidantes) para crescer, enquanto que os anaeróbios de Eh negativos (redutores).
Nutrientes	Para um bom crescimento e funcionamento, os microrganismos presentes nos alimentos necessitam basicamente de: água, fonte de energia, fonte de nitrogênio, vitaminas e fatores de crescimento e minerais.
Substâncias Antimicrobianas	A estabilidade de alguns alimentos diante do ataque de microrganismos deve-se à presença de certas substâncias naturais que mostraram ter atividade antimicrobiana. Alguns exemplos são o eugenol (cravo da Índia e canela), alicina (alho), aldeído cinâmico (canela), etc.
Estruturas Biológicas	A cobertura natural de alguns alimentos fornece excelente proteção contra a entrada e consequente degradação causada por microrganismos. Exemplos são cascas de sementes, frutas, ovos e a pele dos animais.
<b>Parâmetros Extrínsecos</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
Temperatura de Armazenamento	Os microrganismos, individualmente ou como um grupo, crescem em uma ampla faixa de temperatura. A temperatura afeta diretamente as atividades metabólicas do microrganismo.
Umidade Relativa (UR)	A UR do meio de armazenamento é importante tanto sob o ponto de vista de $A_a$ no interior dos alimentos como do crescimento de microrganismos sobre sua superfície. Quando alimentos com baixa $A_a$ são armazenados em locais de alta UR, eles absorvem água e promovem um meio propício ao crescimento de microrganismos.
Concentração de gases	Gases como o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e o ozônio ( $O_3$ ) possuem atividades antimicrobianas, afetando as atividades metabólicas dos microrganismos. Além disso, a ausência de oxigênio ( $O_2$ ) inibe o crescimento de microrganismos aeróbios e vice-versa.
Competição com outros microrganismos	Alguns microrganismos naturalmente presentes em alimentos produzem substâncias que são inibidoras ou letais para outros organismos. Estas substâncias incluem antibióticos, bacteriocinas, peróxido de hidrogênio e ácidos orgânicos. Além disso, a velocidade de crescimento dos microrganismos em competição determina qual deles será o mais dominante na população final.



Os microrganismos, de uma maneira geral, em temperaturas inferiores (abaixo de 0°C), não são inativados, isto é, eles não são exterminados. No entanto, a multiplicação destes é cessada, ocorrendo o prolongamento da fase lag. Por outro lado, para temperaturas superiores (acima de 70°C), os microrganismos, de uma maneira geral, são exterminados. Exceções existem para microrganismos formadores de esporos (estruturas resistentes aos efeitos da temperatura), onde somente a aplicação de temperaturas mais elevadas (acima de 100 °C) é capaz de iniciar o extermínio destas estruturas. De uma maneira geral, os fungos filamentosos são mais sensíveis aos efeitos da aplicação de calor (altas temperaturas) do que as bactérias, pois alguns gêneros são capazes de formar esporos termorresistentes<sup>[14]</sup>.

Sendo assim, processos ou operações que utilizam como barreira a aplicação de calor podem ser classificados, de acordo com o binômio temperatura-tempo utilizado, em duas categorias: Pasteurização e Esterilização comercial<sup>[11]</sup>. A pasteurização é suficiente para destruir todas as leveduras, fungos, bactérias gram-negativas e bactérias gram-positivas. Os microrganismos que sobrevivem à pasteurização são as bactérias formadoras de esporos termorresistentes. A esterilização comercial é capaz de exterminar, até níveis extremamente baixos e aceitáveis, todos os microrganismos (células vegetativas e esporos) que podem estar presentes no alimento<sup>[14]</sup>.

### **IV.3.1 Barreiras existentes contra perigos biológicos**

Não foi permitido apresentar neste trabalho as informações sobre pH e umidade (estimativa da  $A_a$ ) dos produtos intermediários preparados durante os processos, isto é, as massas utilizadas para confecção dos produtos, assim como os recheios de capelete, ravióli, fagotini e os recheios das pizzas semi-prontas.

Entretanto, sabe-se que os valores destes parâmetros são eficientes contra o desenvolvimento de uma ampla variedade de microrganismos em todas as massas em geral. Os fungos filamentosos (bolores), causadores de deterioração do produto, são os microrganismos de maior incidência, mas esta sendo ainda muito baixa. Para os recheios, os valores destes parâmetros são maiores, sendo então estes mais susceptíveis ao crescimento dos microrganismos.



A ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária – órgão regulador da sanidade dos alimentos vendidos para consumo no Brasil, segundo a RDC nº 12 de 02 de janeiro de 2001, determina que<sup>[15]</sup>:

*“[...] b) massas alimentícias secas, com ou sem ovos, com ou sem recheio; massas alimentícias frescas, cruas e não fermentadas, com ou sem ovos, com ou sem recheio e cobertura e similares, refrigeradas;*

*c) produtos semi elaborados, com ou sem recheio, com ou sem cobertura (pão de queijo, de batata e similares, pizza, pastéis), refrigerados e similares [...]”*

Devem apresentar concentrações máximas para *Bacillus cereus* de  $5 \cdot 10^3$  UFC/g (b) e  $5 \cdot 10^2$  UFC/g (c), para Coliformes a 45 °C de 100 UFC/g (b) e 50 UFC/g (c), para Estafilococo coagulase positiva de  $5 \cdot 10^3$  UFC/g (b) e  $5 \cdot 10^2$  UFC/g (c) e para *Salmonella* sp. ausência em 25 g (b e c)<sup>[15]</sup>.

As análises microbianas contempladas pela RDC nº 12 visam à detecção de microrganismos patógenos, que devem ter seu controle efetuado, segundo exigência da Anvisa. Estes microrganismos (no caso bactérias patogênicas) são incidentes somente em casos de práticas inadequadas de higiene, sendo os manipuladores os principais veículos destas bactérias. O desenvolvimento destas bactérias, em níveis intoleráveis (caracterizado como um perigo biológico e, em caso de produção de toxinas, perigo químico), é prevenido pela implantação adequada das BPF e seu constante monitoramento e também pela presença de condições desfavoráveis ao crescimento das mesmas, condições presentes nos produtos finais e intermediários ao longo de todo o processo produtivo. Estas medidas preventivas apresentam-se como satisfatórias no controle deste tipo do perigo.

No entanto, isto é válido somente para os produtos que não possuem recheio, pois, conforme citado anteriormente, os recheios são mais susceptíveis ao desenvolvimento destas bactérias. Sendo assim, pode-se considerar que os perigos biológicos de alto risco existem apenas para o processo produtivo de ravióli, capelete, fagotini e pastel aperitivo sabor queijo

Estes perigos são caracterizados pela presença de bactérias patogênicas, em níveis intoleráveis, no produto. Isto se dá porque os fungos filamentosos capazes de se desenvolver no produto são considerados deteriorantes e a chance destes estarem em concentrações favoráveis à produção de micotoxinas é pouco provável.



#### IV.3.1.1 Recheio de carne e frango

Os principais gêneros de bactérias frequentemente encontradas em carnes e aves são listados no Quadro 8. Em geral, a biota das carnes frescas e aves refletem os microrganismos do abate e de suas etapas de processamento, com uma predominância de bactérias gram-negativas. As bactérias de maior incidência são: *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Campylobacter*, *Corynebacterium*, *Enterococcus*, *Listeria*, *Micrococcus*, *Moraxella*, *Pseudomonas*, *Psychrobacter* e *Vagococcus*. As bactérias patogênicas incidentes são: *Bacillus*, *Campylobacter*, *Clostridium*, *Escherichia*, *Listeria*, *Salmonella*, *Staphylococcus* e *Yersinia*. Vale ressaltar que os gêneros patogênicos *Campylobacter* e *Listeria* possuem relatos mais frequentes para as aves.

Quadro 8 – Gêneros de bactérias frequentemente encontradas em carnes e aves. Adaptado de [14].

Gênero	Coloração de Gram	Carnes Frescas	Aves
<i>Acinetobacter</i>	-	XX	XX
<i>Aeromonas</i>	-	XX	X
<i>Alcaligenes</i>	-	X	X
<i>Arcobacter</i>	-	X	
<i>Bacillus</i>	+	X	X
<i>Brochothrix</i>	+	X	X
<i>Campylobacter</i>	-		XX
<i>Carnobacterium</i>	+	X	
<i>Caseobacter</i>	+	X	
<i>Citrobacter</i>	-	X	X
<i>Clostridium</i>	+	X	X
<i>Corynebacterium</i>	+	X	XX
<i>Enterobacter</i>	-	X	X
<i>Enterococcus</i>	+	XX	X
<i>Erysepelothrix</i>	+	X	X
<i>Escherichia</i>	-	X	X
<i>Flavobacterium</i>	-	X	X
<i>Hafnia</i>	-	X	
<i>Kocuria</i>	+	X	X
<i>Kurthia</i>	+	X	
<i>Lactobacillus</i>	+	X	
<i>Lactococcus</i>	+	X	

OBS: X = Casos ocorridos; XX = Relatos mais frequentes.



Quadro 8 – Gêneros de bactérias frequentemente encontradas em carnes e aves. Adaptado de [14].  
(continuação)

Gênero	Coloração de Gram	Carnes Frescas	Aves
<i>Leuconostoc</i>	+	X	
<i>Listeria</i>	+	X	XX
<i>Microbacterium</i>	+	X	X
<i>Micrococcus</i>	+	X	XX
<i>Moraxella</i>	-	XX	X
<i>Paenibacillus</i>	+	X	X
<i>Pantoea</i>	-	X	
<i>Pediococcus</i>	+	X	
<i>Proteus</i>	-	X	X
<i>Pseudomonas</i>	-	XX	XX
<i>Psychrobacter</i>	-	XX	X
<i>Salmonella</i>	-	X	X
<i>Serratia</i>	-	X	X
<i>Shewanella</i>	-	X	
<i>Staphylococcus</i>	+	X	X
<i>Vagococcus</i>	+		XX
<i>Weissella</i>	+	X	
<i>Yersinia</i>	-	X	

OBS: X = Casos ocorridos; XX = Relatos mais frequentes.

Dentre as bactérias patogênicas, todos os gêneros são mesófilos. Porém, os gêneros *Bacillus* e *Clostridium* são capazes de gerar esporos termorresistentes, quando estes são sujeitos a condições adversas ao seu desenvolvimento e manutenção.

Existem duas etapas durante a confecção de Capelete, Ravióli e Fagotini onde é aplicado calor como uma medida de controle. A primeira é o Forno no preparo dos recheios (Etapa 10 e 17, PROC-08, [pág. 49](#)) e a segunda é a pasteurização na produção de Capelete, Ravióli, Fagotini, Pastel recheado e Nhoque (Etapa 06, PROC-03, [pág. 42](#)).

As temperaturas que a carne e o frango atingem no forno são muito maiores que no pasteurizador, podendo o primeiro equipamento ser classificado como um “esterilizador comercial”. Sabendo disso, o forno deveria ser classificado como um PCC, por reduzir para níveis aceitáveis, o risco da incidência de bactérias formadoras de esporos termorresistentes e, conseqüentemente, de bactérias mesófilas, além de reduzir o risco do desenvolvimento de bactérias produtoras de toxinas.



No entanto, este equipamento é um forno industrial, equipamento destinado para preparar refeições em estabelecimentos de serviços de alimentação. A operação é muito dependente dos manipuladores e não são utilizados termômetros para indicação de temperatura. Esta operação é controlada manualmente pelo painel de controle da temperatura do fogão e pelo tempo de processamento. Concluindo, esta é uma etapa de pouca confiança para um perigo de alto risco.

Continuando, os esporos termorresistentes de *Bacillus* e *Clostridium* somente seriam devidamente exterminados nesta etapa do processo. Além disso, após o forneamento dos pedaços de carne ou do frango, estes são postos em descanso para promover um resfriamento natural (Etapa 13 e Etapa 18 – PROC-08). Esta etapa de resfriamento pode acarretar no crescimento das bactérias do gênero *Clostridium* e *Bacillus*, pois o extermínio de esporos termorresistentes não é totalmente eficiente.

Esta é uma etapa crítica do processo de preparo dos recheios porque existe a possibilidade de produção de toxinas pelas bactérias mencionadas acima. Além disso, em caso de condições inadequadas de higiene (falha que tem como principal barreira as BPF), existe a possibilidade do crescimento de *Staphylococcus* spp., gênero capaz de produzir toxinas termorresistentes.

Uma recomendação, de caráter conservativo, seria que as Etapas 13 e 18 do processo de produção dos recheios fossem classificadas como PCs. Outra recomendação seria a reavaliação destas etapas quanto ao tempo de descanso que os pedaços de carne e frango são submetidos. Uma possível solução seria o resfriamento forçado (ou rápido) dos pedaços para que não haja tempo suficiente para o crescimento de bactérias, com conseqüente produção de toxinas.

Apesar do que foi discutido acima, o crescimento destes tipos de bactérias é muito dependente da  $A_a$ . Para o *Clostridium botulinum* tipo E, a  $A_a$  mínima para seu crescimento é igual a 0,97 e para os tipos A e B o valor da  $A_a$  mínima é de 0,94. A espécie *Bacillus subtilis* tem como  $A_a$  mínima para seu crescimento o valor de 0,95. Para o *Staphylococcus aureus* o valor da  $A_a$  mínima é de 0,86, sendo este um valor mais baixo comparado com os demais mencionados<sup>[14]</sup>. De acordo com os dados das análises de umidade dos demais recheios preparados na planta industrial, não há a possibilidade de que estes valores para a atividade de água sejam encontrados para estes produtos intermediários.



De acordo com as informações anteriores, conclui-se que é pouco provável o desenvolvimento de bactérias dos gêneros *Bacillus*, *Clostridium* e *Staphylococcus* durante o processamento de Capelete, Ravióli e Fagotini. Isto é afirmado porque foi avaliada a relação entre o risco e a eficiência das barreiras existentes contra este perigo.

Com isso, o forno não foi classificado como um PCC. Só que não existe apenas o perigo de esporos termorresistentes dos gêneros *Bacillus* e *Clostridium*, mas também das outras bactérias mesófilas, produtoras ou não de toxinas. A pasteurização, operação realizada em um equipamento instrumentado e calibrado, apresenta-se como uma etapa de maior confiança e pode ser classificada como um PCC para o perigo biológico de células vegetativas de bactérias patogênicas mesófilas e para o perigo químico de toxinas biológicas produzidas por bactérias mesófilas.

#### **IV.3.1.2 Recheio de queijo**

A maioria dos queijos, mas não todos, resultam de uma fermentação láctica. Com isso, a biota predominante presente nos queijos é de bactérias lácticas, como os gêneros *Lactobacillus* e *Streptococcus*. Alguns queijos também são produzidos ou maturados por fungos, como o queijo gorgonzola e o roquefort<sup>[1],[14]</sup>.

O baixo teor de umidade dos queijos duros e semiduros faz com que eles não sejam deteriorados pela maioria dos microrganismos, embora os fungos filamentosos possam crescer nesses produtos. Alguns queijos maturados têm um potencial de oxirredução (Eh) suficientemente baixo para o crescimento de microrganismos anaeróbicos. Quando a atividade de água permite o crescimento, as bactérias anaeróbicas são as responsáveis pela deterioração e contaminação destes produtos. As bactérias do gênero *Clostridium* são conhecidas como causadoras do estufamento de queijos. Bactérias aeróbicas, como as do gênero *Bacillus* também podem crescer nos queijos em caso de presença de O<sub>2</sub> e alta A<sub>a</sub><sup>[14]</sup>.

Entre os anos de 1973 e 1992, houve 32 surtos alimentares envolvendo queijo nos EUA, com 1.700 casos e 58 mortes – 52 causadas pela *L. monocytogenes* em um surto na Califórnia em 1985. Os queijos moles foram os mais envolvidos, e as pasteurizações impróprias foram frequentes<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Altekruse, S.F., B.B. Timbo, J.C. Mobray, et al. 1998. Cheese-associated outbreaks of human illness in the United States, 1973 to 1992: Sanitary manufacturing practices protect consumers. *J. Food Protect.* 61:1405-1407.



Na confecção de Capelete de queijo, Ravióli de queijo, Fagotini de queijo e Pastel aperitivo sabor queijo, a pasteurização se apresenta como a única medida de controle mitigadora capaz de reduzir ou eliminar o perigo de células vegetativas de bactérias patogênicas mesófilas e o perigo químico de toxinas biológicas produzidas por bactérias mesófilas, devendo ser novamente reiterada que esta etapa seja classificada como um PCC. Barreiras preventivas como a atividade de água reduzida do recheio de queijo e a adequação das BPF minimizam a incidência destes perigos.

## **IV.4 Seleção dos PCCs**

Conforme discutido em todo o [CAPÍTULO IV](#), das etapas existentes no Processo 03 – Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque, a Etapa 06 – Pasteurização e uma etapa não existente no processo (Detecção de Metais – gerada como recomendação) foram selecionadas como PCCs. No [Quadro 9](#), são apresentadas estas duas etapas, os perigos controlados pelos PCCs e as respectivas medidas de controle e limites críticos aplicados para efetuar o controle destes perigos.

O PCC-03-02, situado no Processo 03 – Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque, Etapa 06 – Pasteurização, controla o perigo biológico de células vegetativas de bactérias patogênicas mesófilas e o perigo químico de toxinas biológicas produzidas por bactérias mesófilas (*Staphylococcus* spp.). Esta operação foi projetada tanto com um caráter de tecnologia de alimentos (aumento da vida de prateleira, redução da carga microbiana de fungos filamentosos deterioradores) quanto com um caráter de segurança dos alimentos (eliminação de bactérias patogênicas mesófilas). Esta etapa não é capaz de eliminar totalmente o perigo biológico em discussão, mas sim reduzi-lo a níveis toleráveis para a saúde do consumidor. Para o perigo químico, este PCC atua na redução da carga microbiana de bactérias mesófilas produtoras de toxinas, eliminando o evento iniciador deste perigo.

As bactérias mesófilas em questão são as dos gêneros *Campylobacter*, *Escherichia*, *Listeria*, *Salmonella*, *Staphylococcus* e *Yersinia* (Para os recheios de carne e frango); Para o recheio de queijo, as bactérias mesófilas são principalmente as dos gêneros *Listeria* e *Staphylococcus*. As toxinas biológicas em questão, para todos os recheios, são as produzidas pelas bactérias do gênero *Staphylococcus*, toxinas termorresistentes. O desenvolvimento deste gênero é controlado pelo seu extermínio, com a aplicação de calor.



Cabe ressaltar que o produto Nhoque não possui estes perigos potenciais, pois não tem como ingredientes algum tipo de recheio.

O PCC-PL-03, dado pela etapa de Detecção de Metais, situado nos processos controla o perigo potencial de partículas metálicas de tamanho maior ou igual a 7 mm. Esta operação foi projetada com um caráter de segurança dos alimentos. Esta etapa não é capaz de eliminar o perigo em si, mas sim de descartar todos os produtos contaminados com este perigo. Esta etapa não é existente atualmente nos processos da planta industrial, a qual é uma recomendação gerada da análise prévia dos perigos físicos decorrentes do desgaste de equipamentos.

**Quadro 9 – Etapas selecionadas como PCCs da planta industrial da Nápoles.**

#	Etapa	Perigo	Medida de Controle	Limites Críticos	Nº PCC <sup>2</sup>
06	Pasteurização	Células vegetativas de bactérias patogênicas mesófilas Toxinas biológicas produzidas por bactérias mesófilas ( <i>Staphylococcus</i> spp.)	Temperatura interna do pasteurizador Tempo de residência	≥ 85°C ≥ 4,5 min	<b>PCC-03-02</b>
19					
14					
12	Detecção de Metais <sup>1</sup>	Partículas metálicas de tamanho maior ou igual a 7 mm	Campo magnético de detecção de partículas metálicas	d <sub>p</sub> = 7 mm	<b>PCC-PL-03</b>
12					
09					

<sup>1</sup>Esta etapa não existe nos processos produtivos. Ela é contemplada aqui, segundo a recomendação gerada na análise prévia dos perigos, [Seção IV.1.1](#).

<sup>2</sup>Nomenclatura dos PCCs: PCC-(Processo)-(Nº Seq.). Para PCCs gerais de vários processos: PCC-PL-(Nº Seq.). PL = Planta.



## CAPÍTULO V. CONFIABILIDADE DOS PCCs

A princípio, os dois PCCs selecionados devem, de forma garantida, eliminar ou reduzir a níveis toleráveis os respectivos perigos que controlam. Para que isto ocorra, vários fatores devem ser avaliados, sendo alguns deles:

- A capacidade que a medida de controle possui de eliminar ou reduzir o perigo;
- A reprodutibilidade das condições de processo que garantem a eliminação ou redução do perigo;
- Possíveis causas que podem levar à falha do PCC;
- Possíveis causas que podem levar ao aumento do perigo, podendo o PCC não ser mais capaz de garantir a segurança do alimento.

Os fatores listados acima estão relacionados com a validação de PCCs, o que é discutido detalhadamente pela Norma ABNT NBR ISO 22.000:2006 (Norma ISO 22.000) – *Sistemas de gestão da segurança de alimentos*<sup>[5]</sup>. O item 8.2 “Validação das combinações de medidas de controle” possui o seguinte texto:

*“Antes da implementação das medidas de controle a serem incluídas no(s) PPR operacional(is) e no plano APPCC e depois de qualquer modificação nestes (ver 8.5.2), a organização deve validar (ver 3.15) que:*

- a) *as medidas de controle selecionadas são capazes de realizar o controle pretendido do(s) perigo(s) à segurança de alimentos, para o qual estas foram designadas, e*
- b) *as medidas de controle são eficazes e capazes de, em combinação, assegurar o controle do(s) perigo(s) à segurança de alimentos identificado(s) para obter produtos finais que satisfaçam os níveis aceitáveis definidos.*

*Se o resultado da validação mostrar que um ou ambos os elementos acima não podem ser confirmados, a medida de controle e/ou suas combinações devem ser modificadas e reavaliadas (ver 7.4.4).*

*As modificações podem incluir alterações nas medidas de controle (isto é, parâmetros de processo, rigor e/ou suas combinações) e/ou mudança(s) nas matérias-primas, tecnologias de fabricação, características do produto final, métodos de distribuição e/ou uso pretendido final.”*

De acordo com o texto apresentado acima, um estudo extenso das medidas de controle selecionadas deve ser elaborado para que seja possível validar a eliminação ou redução dos respectivos perigos potenciais. Como o objetivo deste trabalho foi apresentar a técnica de confiabilidade como uma ferramenta para os sistemas de gestão de segurança dos alimentos,



realizou-se somente o estudo de confiabilidade de um dos PCC selecionados para a planta industrial da Nápoles. O estudo de um único PCC deu margem a um nível de detalhamento maior de suas operações, instrumentos e equipamentos, o que possibilitou detalhar ainda mais o estudo de confiabilidade.

Foi utilizado o PCC-03-02 (Processo 03 – Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque, Etapa 06 – Pasteurização) no estudo de confiabilidade deste trabalho. Os motivos pelo qual este PCC foi utilizado são que:

- A operação desta etapa é bastante automatizada, sendo possível a aplicação da maioria dos conceitos de confiabilidade e probabilidade de falha;
- A etapa consiste de equipamentos e instrumentos de operações dependentes umas das outras, onde esta etapa pode ser considerada um sistema complexo.

De acordo com as exigências da Norma ISO 22.000 apresentadas anteriormente, um estudo de confiabilidade dos equipamentos e instrumentos associados a um PCC pode ser utilizado para que uma organização possa atender aos requisitos do item 8.2 da respectiva norma. Além disso, o item 8.3 “*Controle de monitoramento e medição*” também da Norma ISO 22.000 possui o seguinte texto<sup>[5]</sup>:

*“A organização deve fornecer evidências de que os métodos e equipamentos de monitoramento e medição especificados são adequados para assegurar o desempenho dos procedimentos de monitoramento e medição.*

*Onde for necessário assegurar resultados válidos, os equipamentos e métodos de medição usados devem ser*

- a) *calibrados ou verificados em intervalos especificados, ou antes do uso, contra padrões de medição rastreáveis a padrões de medição nacionais ou internacionais; quando tais não existem, a base usada para a calibração ou verificação deve ser registrada,*
- b) *ajustados e reajustados quando necessário,*
- c) *identificados para permitir que a situação de calibração seja determinada,*
- d) *protegidos de ajuste que possam invalidar os resultados da medição, e*
- e) *protegidos de dano e deterioração.*

*Registros dos resultados de calibração e verificação devem ser mantidos.*



*Além disso, a organização deve avaliar a validade dos resultados das medições anteriores quando for verificado que o equipamento ou processo não esteja conforme os requisitos. Se o equipamento de medição não estiver conforme, a organização deve tomar ação apropriada no equipamento e em qualquer produto afetado. Os registros de tais avaliações e as ações resultantes devem ser mantidos.*

*Quando usado no monitoramento e medição de requisitos especificados, a capacidade do software deve ser confirmada para satisfazer a aplicação pretendida. Isto deve ser realizado antes do uso inicial e reconfirmado sempre que necessário.”*

Pode-se interpretar facilmente que este item da norma exige que a instrumentação associada a um PCC seja adequada para assegurar que as devidas medições sejam eficientes. Se esta interpretação for aplicada para uma malha de controle ou de instrumentação, então uma malha associada a um PCC não deveria apresentar nenhum tipo de falha. Um estudo de confiabilidade desta malha seria então bastante útil para que sejam cumpridas tais exigências. Além disso, evidências documentadas de um estudo de confiabilidade são úteis para que a organização, durante uma auditoria, possa mostrar que seus métodos e equipamentos de monitoramento e medição são adequados.

Além disso, segundo o item 7.6.5, o qual descreve as exigências que devem ser cumpridas quando os limites críticos de um PCC são excedidos, e o item 8.5.1, o qual descreve como deve ser procedida a melhoria contínua do sistema de gestão, pode-se interpretar que a falha frequente de um PCC indica uma ineficácia do sistema. Um estudo de confiabilidade dos PCCs, que pode possibilitar a redução da probabilidade de falha dos mesmos, pode ser utilizado para solucionar este problema.

A utilização de malhas de controle ou instrumentação e de equipamentos eficientes e de alta confiabilidade faz com que a falha de um PCC seja dominada somente por causas extrínsecas ao processo, reduzindo o número das fontes dos perigos e facilitando o gerenciamento do sistema.

## **V.1 Descrição do processo do PCC-03-02**

O PCC-03-02 controla o perigo biológico de células vegetativas de bactérias patogênicas mesófilas e o perigo químico de toxinas biológicas produzidas por bactérias mesófilas. A etapa de pasteurização consiste de um pasteurizador e de uma caldeira elétrica como equipamentos. No pasteurizador, ocorre o aquecimento do produto utilizando vapor d'água por contato direto, onde o tempo de residência do produto (parâmetro de processo associado ao



monitoramento da respectiva medida de controle do PCC) deve ser maior que 4 minutos e 30 segundos. O produto é continuamente alimentado no equipamento pelo auxílio de correia transportadora. A caldeira elétrica é responsável pela geração de vapor d'água saturado a uma pressão de 2 kgf/cm<sup>2</sup> (121 °C). A temperatura interna de operação do pasteurizador deve ser maior que 85°C (outro parâmetro do processo associado ao monitoramento do PCC).

A quantidade de vapor d'água que alimenta o pasteurizador é controlada por uma válvula de alívio, ajustada para abrir quando a pressão a montante atinge 2 kgf/cm<sup>2</sup>. A pressão do vapor d' água aumenta à medida que a caldeira elétrica vaporiza a água de processo em contato com seus quatro resistores elétricos. O vapor d'água saturado expande ao passar pela válvula de alívio, pois a pressão de operação do pasteurizador é aproximadamente igual a 1 atm. O vapor d' água se torna superaquecido e reduz sua temperatura para aproximadamente 115 °C. A troca de calor com o produto no pasteurizador faz com que uma pequena parte do vapor d' água condense e este condensado é descartado. A grande parte do vapor d'água, após efetuar a troca de calor, é liberada para o ambiente.

A dinâmica do processo é intermitente, pois a malha de controle da temperatura interna do pasteurizador (variável controlada) aciona os resistores elétricos da caldeira pelo auxílio de chaves (*switchs*). Quando o limite mínimo da variável controlada é alcançado, sendo este limite o status estipulado para o *switch* de temperatura baixa (TSL, do inglês "*Temperature Switch Low*"), o *switch* fecha o circuito elétrico entre os resistores e a rede elétrica, iniciando a geração de vapor. Quando o limite máximo da variável controlada é alcançado, sendo este limite o status estipulado para o *switch* de temperatura alta (TSH, do inglês "*Temperature Switch High*"), o *switch* abre o circuito elétrico entre os resistores e a rede elétrica, paralisando a geração de vapor.

O nível de água de processo na caldeira elétrica é controlado com auxílio de um controlador que aciona uma válvula pneumática, responsável pela alimentação de água de processo. Apesar desta malha de controle ser contínua, devido à característica intermitente do processo, o acionamento da válvula também é intermitente. Este controle tem por objetivo garantir uma quantidade mínima de água de processo acumulada na caldeira, para que vapor d'água seja sempre produzido quando for necessário.

Na figura a seguir é apresentado um fluxograma P&ID do PCC-03-02.

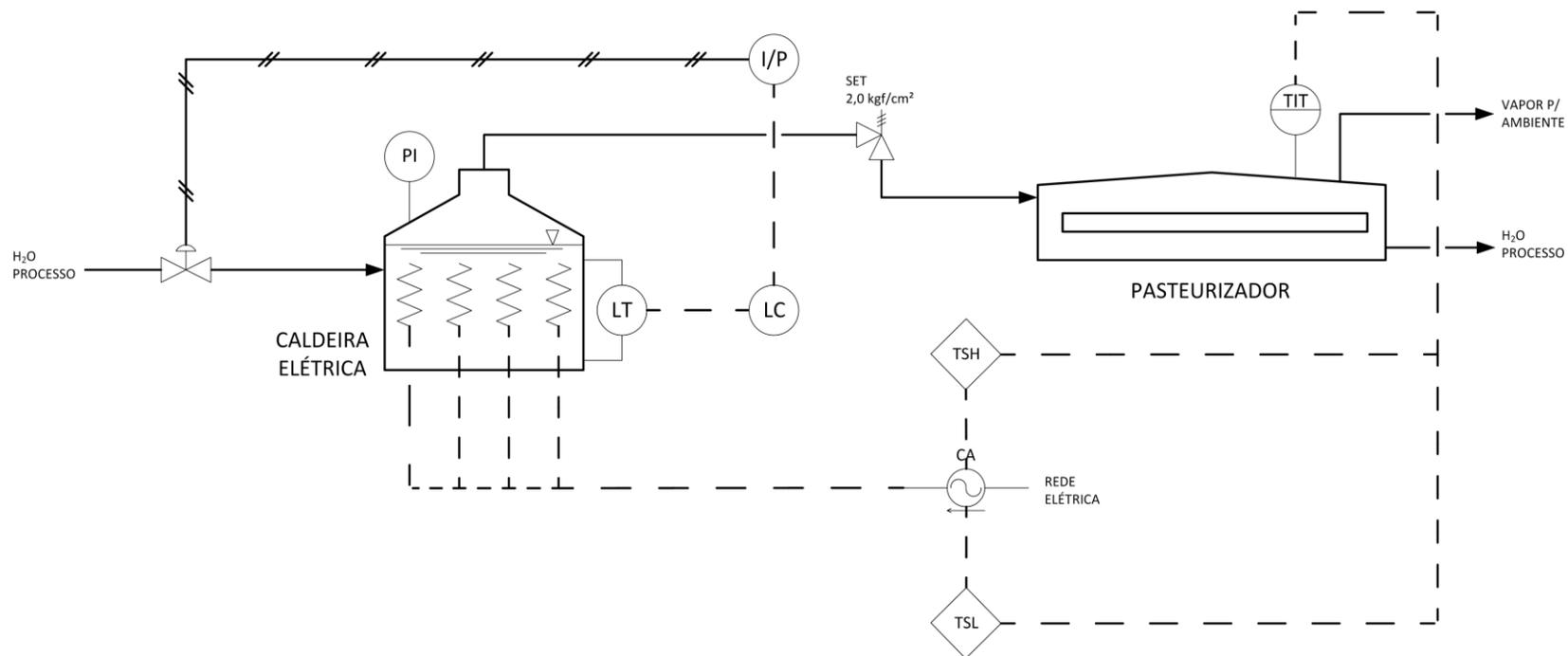


Figura 18 – Fluxograma P&ID do processo do PCC-03-02, processo de pasteurização.

## V.2 Confiabilidade do PCC-03-02

O PCC-03-02 possui duas malhas de controle, uma para controlar a temperatura interna do pasteurizador e outra para controlar o nível de água de processo acumulada na caldeira elétrica. Estas duas malhas de controle são apresentadas na [Figura 19](#) e na [Figura 20](#).

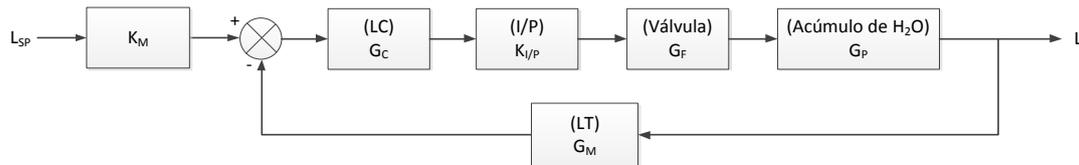


Figura 19 – Diagrama de blocos da malha de controle do nível de água na caldeira elétrica.

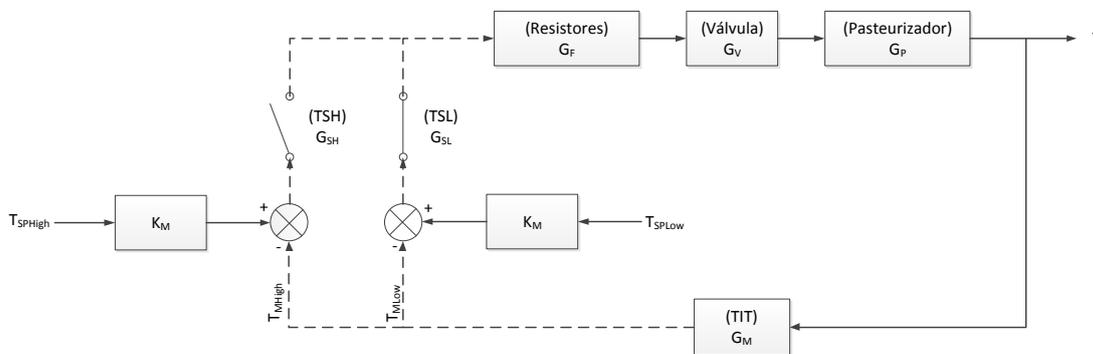


Figura 20 – Diagrama de blocos da malha de controle da temperatura interna do pasteurizador.

É óbvio que a operação irá falhar se a malha de controle da temperatura falhar, mas, se a malha de controle do nível de água na caldeira falhar, a operação também irá falhar, pois a falta de água de processo para a geração de vapor irá fazer com que vapor d'água não seja gerado, fazendo com que a pressão da caldeira não atinja a pressão estipulada para abertura da válvula de alívio, acarretando na ausência de alimentação de vapor para o pasteurizador, com consequente falta de aquecimento do produto. Sendo assim, as duas malhas devem ser consideradas no cálculo da confiabilidade do processo.

Pode-se verificar também que se um dos componentes das duas malhas falhar, então o processo todo irá falhar. Com isso, a representação em diagramas de blocos da confiabilidade deste processo deve ser tal que todos os componentes das duas malhas estejam em série, conforme a [Figura 5 \(a\)](#). Entretanto, algumas considerações devem ser feitas.



## V.2.1 Considerações e premissas iniciais

Primeiramente, deve-se definir que a falha do PCC-03-02 é dada pela medição de um valor para a temperatura interna do pasteurizador menor do que o limite crítico, que possui o valor de 85 °C. Sendo assim, falhas dos componentes que causem um aumento desta temperatura acima dos limites estipulados para o processo não devem ser consideradas. Isto acarreta no descarte da utilização de alguns modos de falha (a taxa de falha total será menor) dos equipamentos e instrumentos.

Por exemplo, um transmissor de nível, temperatura, etc. podem falhar por vários motivos, sendo alguns destes dados por<sup>[16]</sup>:

- *Output*:
  - Errado;
  - Alto;
  - Baixo;
- Falha na demanda;
- Atuação espúria;
- Problemas menores em serviço (Componente novo);
- Outros tipos de falha.

Porém, para o transmissor de nível utilizado para controlar o nível de água de processo na caldeira elétrica, alguns destes tipos de falha não devem ser considerados, como a atuação espúria e falha na demanda porque o transmissor estará sempre operante durante o processo. Problemas menores em serviço também não devem ser considerados, pois o componente deve ser testado e calibrado antes de ser utilizado em um PCC (Norma ISO 22.000, item 8.3).

Por outro lado, para o transmissor de temperatura utilizado para controlar a temperatura interna do pasteurizador, a atuação espúria e a falha na demanda devem ser considerados. Porém, um *output* baixo não precisa ser considerado, já que este modo de falha do transmissor causaria somente um aumento da temperatura, o que não é considerado uma falha do PCC.

Conclui-se então que uma avaliação preliminar deve ser feita para cada componente, tendo-se como base as características do processo e do PCC, com o intuito de escolher quais modos de falha devem ser considerados ou não.



Este estudo de confiabilidade tem como pressuposto que os componentes não possuem nenhuma evidência de degradação. Isto acarreta na possibilidade de se utilizar o modelo de taxa de falha constante para o cálculo da confiabilidade do sistema. Esta suposição é válida já que a Norma ISO 22.000, no item 8.3, exige que os instrumentos de medição devam estar protegidos de deterioração. Além disso, a norma comenta várias vezes, em toda extensão de seu texto, sobre a aplicação de manutenção preventiva como um Programa de Pré-requisitos (PPR).

### **V.2.1.1 Componentes que não foram avaliados**

Alguns componentes, devido à ausência de dados, não foram considerados no estudo de confiabilidade (o que é equivalente a considerar os mesmos com 100% de confiança). Isto mostra uma limitação deste estudo, pois a confiabilidade do sistema sendo avaliado não retrata a realidade em campo.

Os componentes existentes no processo de pasteurização que não foram avaliados foram:

- O pasteurizador;
- Os *switchs* de temperatura (TSH e TSL);
- O transdutor corrente/pressão (I/P);
- O controlador de nível (LC).

Um caso particular seria a falha do pasteurizador, que resultaria na falha do processo de pasteurização, tendo como principais causas:

- Vazamento de vapor d'água para o ambiente devido à presença de furos no equipamento, acarretando em perda de calor e aquecimento inadequado do produto;
- Desvio dado por fluxo alto de produto devido a um aumento não proposital na velocidade da correia transportadora;

A primeira causa listada acima apenas existiria se não fosse realizado um programa manutenção preventiva na planta industrial. Este programa, considerado um PPR, é exigido pela norma ISO 22.000 e pelo manual de BPF da Nápoles.

A falha do PCC devido a desvios no fluxo de produto no pasteurizador também não foi contemplada. Em caso de desvios de fluxo maior de produto alimentando o pasteurizador, o tempo de residência do mesmo, que é um dos parâmetros do processo associados ao



monitoramento do PCC-03-02, poderia estar abaixo do limite crítico de 4,5 min. Este evento de falha não foi contemplado devido à ausência de dados disponíveis, sendo isto mais uma limitação deste estudo. Concluindo, a falha do PCC se daria apenas por falhas nos equipamentos ou nos instrumentos associados à temperatura interna do pasteurizador e a geração de vapor.

### **V.2.1.2 Componentes avaliados e respectivos dados utilizados**

Foi utilizado o modelo de taxa de falha constante para o estudo de confiabilidade do processo do PCC-03-02. Com isso, foi necessária a obtenção de dados para a taxa de falha dos componentes. Foram utilizados os dados disponíveis no OREDA® 4ª edição<sup>[16]</sup> para os diferentes componentes presentes no sistema do PCC-03-02.

É importante ressaltar que os dados disponíveis no OREDA® são referentes a componentes utilizados nos processos de exploração e produção de petróleo em plataformas, onde as condições operacionais e o ambiente a que os componentes estão submetidos são diferentes do cenário existente nas indústrias de alimentos. Isto mostra uma limitação desta avaliação no estudo de confiabilidade do PCC.

É muito importante que os dados utilizados sejam os mais reais possíveis e que representem fidedignamente a confiabilidade dos componentes e, conseqüentemente, a confiabilidade do PCC. No entanto estes dados não se encontram disponíveis<sup>[7]</sup>.

Na [Tabela 1](#) é apresentada uma relação entre os componentes que foram utilizados no estudo de confiabilidade do PCC-03-02 com os dados de taxa de falha retirados de componentes semelhantes, listados no OREDA® 4ª edição. Os dados de taxa de falha são apresentados para cada modo de falha diferente que pode ocorrer em cada componente. Todos estes valores foram somados e este valor total foi o utilizado como a taxa de falha de cada componente. Estes valores totais da taxa de falha estão em termos de hora operacional. O cálculo do tempo operacional, em horas, foi efetuado da seguinte forma:

$$t_{op}(h) = t_{op}(anos) \cdot 12 \frac{meses}{ano} \cdot 22 \frac{dias}{mês} \cdot 8 \frac{h}{dia}$$

E a função  $R(t)$  foi sempre plotada contra o tempo operacional em anos, porém utilizando no cálculo da função o tempo operacional em horas. Este cálculo é feito desta forma, pois a planta industrial da Nápoles opera normalmente de segunda-feira à sexta-feira, em uma jornada de trabalho de oito horas.



Tabela 1 – Dados de taxa de falha dos componentes do PCC-03-02. Retirado de [16].

Componente	OREDA®	Sigla	Tipo de falha <sup>a</sup>	$\lambda_i \cdot 10^6$ (1/h <sub>op</sub> )	Espaço amostral (N)	$\Delta t_{op} \cdot 10^{-6}$ (h) in service <sup>b</sup>
Transmissor e indicador de temperatura	Process Sensors	TIT	OER	2,38	209	6,6035
			DEM	1,02		
			OBA	0,16		
			ESP	0,92		
			<b>TOTAL</b>	<b>4,48</b>		
Transmissor de nível	Process Sensors	LT	OER	2,38	209	6,6035
			DEM	1,02		
			OBA	0,16		
			ESP	0,92		
			<b>TOTAL</b>	<b>4,48</b>		
Caldeira elétrica	Heaters and Boilers Electric heater/boiler	CE	VAZ	17,00	2	0,0534
			IER	33,50		
			<b>TOTAL</b>	<b>50,50</b>		
Válvula de controle	Valves Process control	VC	ATR	0,21	319	8,5060
			DEM	3,58		
			REG	3,16		
			VAZ	0,63		
			ESP	0,19		
			EST	0,10		
			OUT	0,20		
<b>TOTAL</b>	<b>8,07</b>					
Válvula de alívio	Valves Relief PSV-Conventional	VA	DEM	2,59	170	4,8847
			VAZ	1,17		
			<b>TOTAL</b>	<b>3,76</b>		

<sup>a</sup>OER: Output errado. DEM: Falha na demanda. OBA: output baixo. ESP: Atuação espúria. VAZ: Vazamento. IER: input errado. REG: Falha na regulação. EST: Deficiência estrutural. OUT: Outros/Desconhecido.

<sup>b</sup>Tempo de serviço operacional agregado. Retirado do OREDA® 4ª edição.

## V.2.2 Resultados da avaliação da confiabilidade do PCC-03-02

A [Equação 17](#), que representa a confiabilidade de um sistema em função do tempo, utilizando-se o modelo de taxa de falha constante, foi usada para estimar a confiabilidade do PCC-03-02 com o decorrer do tempo:

$$R(t) = \exp(-\lambda_0 t)$$

Na figura a seguir, é apresentado um gráfico da confiabilidade do PCC-03-02,  $R(t)$ , contra o tempo operacional, em anos.

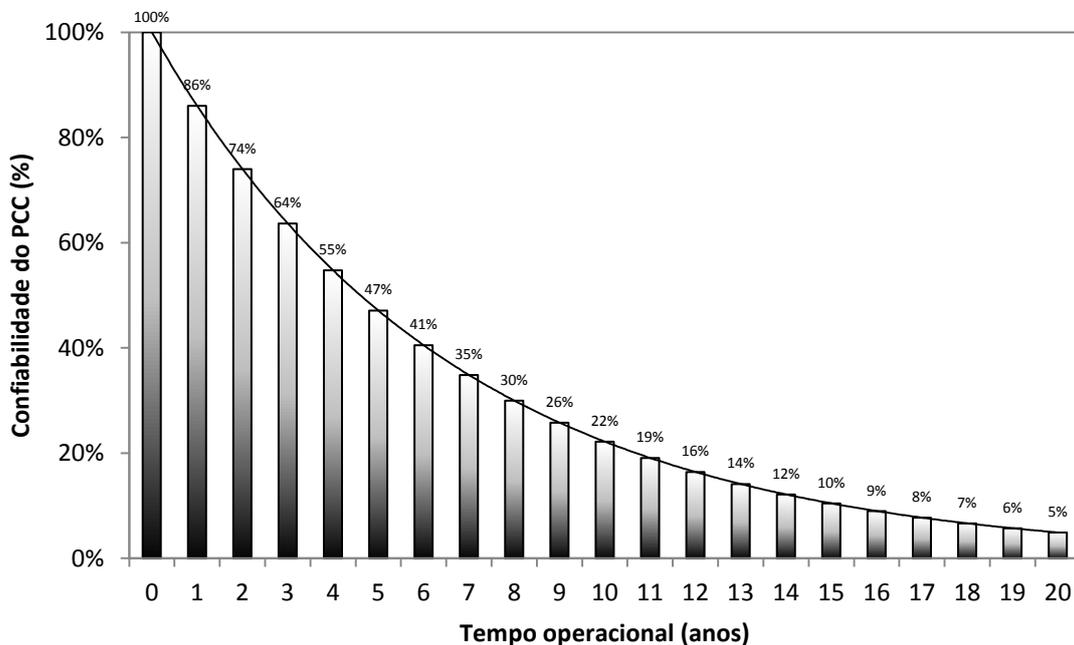


Figura 21 – Confiabilidade do PCC-03-02 em função do tempo.

Verifica-se o rápido decaimento da confiabilidade do sistema com o decorrer do tempo, sendo a confiabilidade do PCC menor que 50% após cinco anos de operação. O MTTF do PCC-03-02 pode ser calculado utilizando a [Equação 19](#):

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_0}$$



O valor encontrado para o MTTF do PCC-03-02 foi de 6,64 anos. De forma simples, isto indica que o processo de pasteurização irá falhar em torno de 6,64 anos. Esta avaliação da confiabilidade do processo de pasteurização não contemplou a aplicação de manutenção preventiva e corretiva, intervalos de testes e/ou substituição de componentes, o que promove este decaimento rápido da confiabilidade do PCC com o tempo.

Conforme citado anteriormente, é uma exigência da Norma ISO 22.000 e das BPF que um sistema de gestão de segurança dos alimentos possua como PPR um programa de manutenção preventiva e inspeção dos equipamentos e instrumentos. Tais medidas preventivas possuem a capacidade de restaurar os equipamentos e instrumentos a condições como se os mesmos fossem novos ou recentes<sup>[7]</sup>.

Isto implica no aumento da confiabilidade de um sistema, de tempos em tempos que é realizada uma manutenção preventiva. O estabelecimento de intervalos de inspeções e testes de desempenho também promove o aumento da confiabilidade de um sistema, partindo-se do pressuposto de que, se for encontrado algum tipo de falha no sistema, este será reparado. Deve-se entender que, durante uma inspeção ou teste de desempenho, uma possível falha do sistema não ocorre durante sua operação, ou seja, este evento de falha não deve ser contabilizado na probabilidade de falha. No entanto, o reparo consequente da constatação desta falha acarreta no aumento da confiabilidade do sistema, conforme explicado antes.

Conclui-se então que um programa de manutenção preventiva e inspeção dos equipamentos e instrumentos auxiliam bastante a eficiência e operação segura dos PCCs. Com isso, mesmo que os equipamentos ou uma malha de instrumentação e controle, associados a um PCC, sejam configurados e projetados para apresentar uma confiabilidade alta, deve-se aplicar a manutenção e inspeção dos mesmos, como algo conservativo para obter maior eficiência e segurança do PCC.

A falha dos equipamentos pode ser considerada uma falha segura (*fail-safe*), já que o processo estaria comprometido e a falha seria detectada pelos instrumentos de medição. Mesmo sendo possível a detecção da falha do PCC, uma falha frequente de PCCs é considerada uma não-conformidade, segundo as exigências da Norma ISO 22.000 e BPF, pois isto seria caracterizado como um PPR (no caso, manutenção preventiva) inadequadamente estabelecido e também como uma ausência de melhoria contínua do sistema de gestão. Por causa disto, a confiabilidade dos equipamentos, e não somente da instrumentação, também deve ser avaliada.



Na [Tabela 1](#), há uma coluna referente ao espaço amostral de cada componente, isto é, o número de equipamentos que tinham informações disponíveis para se estimar a taxa de falha. Verifica-se que para a caldeira elétrica, o espaço amostral deste componente é dado somente por dois equipamentos.

Isto acarreta em valores imprecisos para a taxa de falha da caldeira elétrica, pois uma análise estatística é limitada para um número muito baixo de amostras. Esta limitação pode ser avaliada pela verificação do desvio padrão das taxas de falha<sup>[16]</sup>. Para a caldeira elétrica, o desvio do modo de falha “vazamento” é igual a  $18,72 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$  e o desvio padrão do modo de falha “input errado” é igual a  $47,14 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ . Estes valores para o desvio padrão são maiores do que o próprio valor médio para as taxas de falha de cada modo (Ver [Tabela 1](#)).

Pode-se verificar também que a caldeira elétrica é o componente que possui o maior valor para a taxa de falha. Valores altos para a taxa de falha resultam em uma confiabilidade que decai rapidamente com o tempo. Além disso, verifica-se que, para o tempo operacional, o dado retirado do OREDA® para a caldeira elétrica possui o menor valor entre os demais. Isto indica que a quantidade de falhas que ocorreram, para um equipamento semelhante em uma plataforma de petróleo, foi pequena. Só que os dados destas falhas foram utilizados para a estimativa da taxa de falha, logo se a quantidade de falhas ocorridas foi baixa, então a estimativa da taxa de falha deve ter sido imprecisa.

Entretanto, a caldeira elétrica não é um equipamento simples, isto é, ela é composta por diversos elementos e dispositivos, como os resistores de aquecimento, transformadores, válvulas internas, entre outros. Seria possível então avaliar separadamente a taxa de falha destes componentes internos, pois, dependendo do sistema em avaliação, alguns componentes devem ser considerados e outros não.



É possível notar também que a caldeira elétrica pode ser classificada como um componente crítico do processo do PCC-03-02, pois é justamente este equipamento o responsável por iniciar toda a medida de controle deste PCC, isto é, se não há geração de vapor, então não haverá aplicação de calor ao produto e o perigo não será controlado. Sendo assim, uma avaliação mais detalhada da confiabilidade deste equipamento deve ser conduzida, levando em consideração a confiabilidade e configuração de seus elementos e dispositivos internos.

No entanto, as limitações discutidas anteriormente devem ser consideradas para que seja realmente afirmada a criticidade deste equipamento. Quanto mais fidedigno às condições de campo for o estudo de confiabilidade, maior será a possibilidade de se obter com mais precisão estimativas para intervalos de manutenção preventiva, intervalos de testes e momentos de substituição dos componentes (partes internas da caldeira).

Agora, se houvesse falha dos instrumentos, a situação seria mais grave. A medição da temperatura interna do pasteurizador (variável de processo utilizada como medida de controle) estaria comprometida e a falha do PCC poderia passar despercebida. Este tipo de falha pode ser considerado como uma falha perigosa (*fail-danger*).

É possível avaliar a confiabilidade da medição da temperatura interna do pasteurizador, onde é contemplada somente a falha do transmissor de temperatura (TIT). Na figura a seguir é apresentada a confiabilidade do TIT em função do tempo.

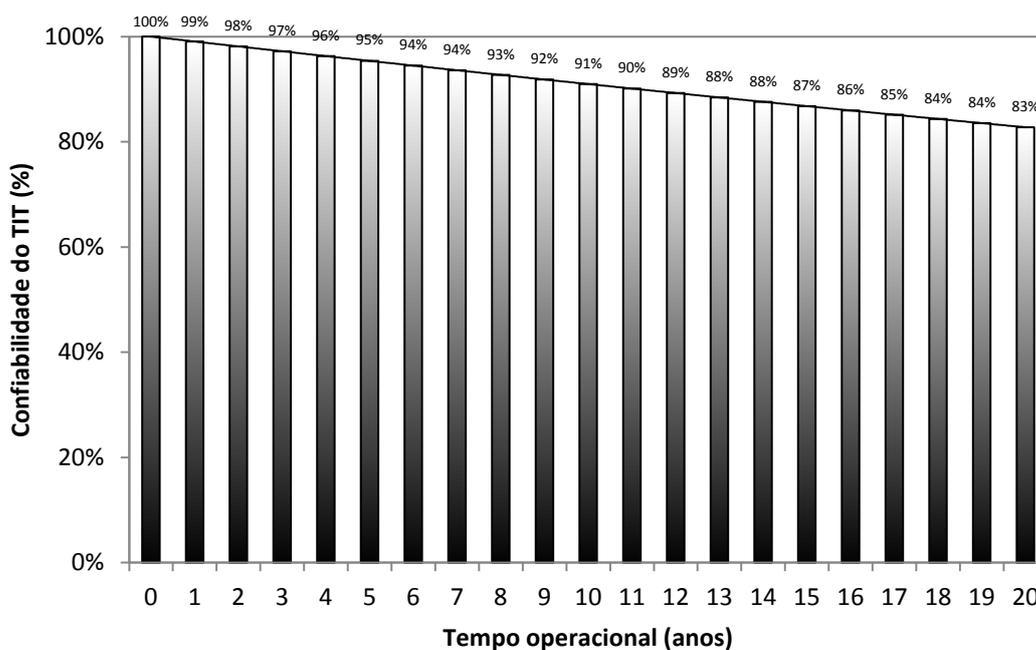


Figura 22 – Confiabilidade do transmissor de temperatura em função do tempo.



Verifica-se o decaimento lento da confiabilidade do TIT com o decorrer do tempo, sendo o respectivo valor encontrado para o MTTF de 105,69 anos. A confiabilidade do TIT para o tempo de 6,64 anos, valor correspondente ao MTTF do PCC-03-02, é de 93,91% (ou a probabilidade de falha do TIT é igual a 6,09%).

Agora, calculando-se a razão entre a probabilidade de falha de cada componente e o somatório da probabilidade de falha de todos os componentes do PCC, em função do tempo, é possível obter um valor que indica a fração da magnitude que a falha de cada componente possui sobre a falha do PCC. A figura a seguir mostra a evolução desta fração com o tempo para cada componente:

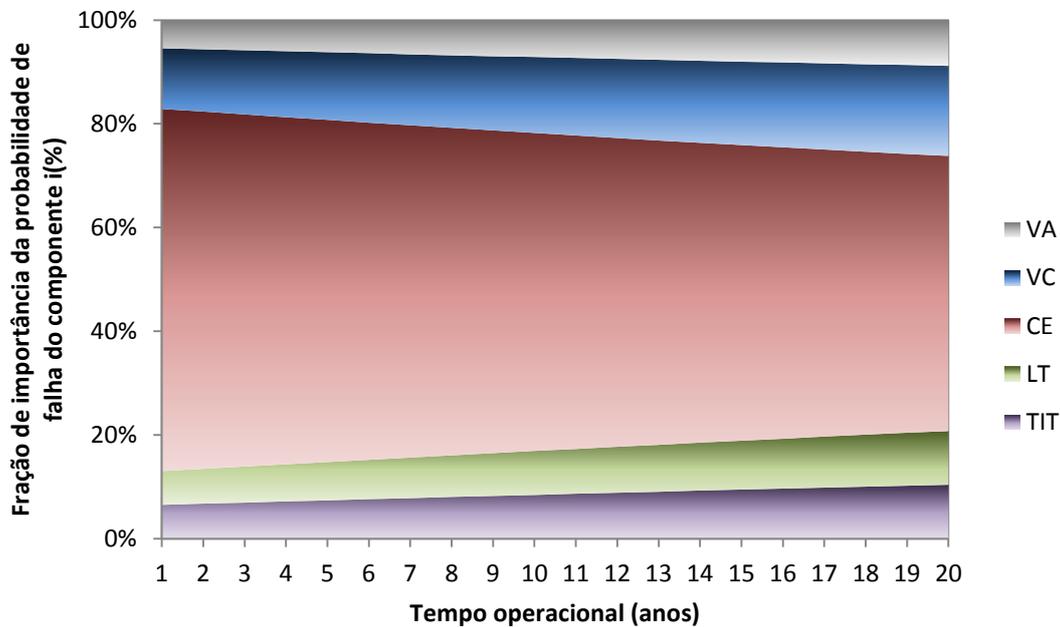


Figura 23 – Evolução da fração de importância da probabilidade de falha dos componentes do PCC-03-02 com o tempo.

Verifica-se pela figura anterior que a fração de importância para os componentes de menor probabilidade de falha (VA, VC, LT e TIT) vão aumentando com o tempo enquanto que a fração de importância da probabilidade de falha da caldeira elétrica (CE) vai diminuindo. A princípio o valor assintótico desta fração, para todos os componentes, é de 20% (pois são cinco componentes). Pode-se atribuir o alto valor da fração para a caldeira elétrica devido à imprecisão dos valores de taxa de falha utilizados para este componente.



O valor encontrado para a fração do TIT, para um tempo igual ao MTTF do PCC (6,64 anos) foi de 7,73%. Isto significa que, dos 63,21% de probabilidade de ocorrer falha do sistema, o transmissor de temperatura é responsável por 7,73% desta probabilidade. Para uma falha em que o desvio do limite crítico passaria despercebido, pode-se considerar que este percentual de importância é alto.

Vale ressaltar que os componentes TSH e TSL não foram contemplados na avaliação da confiabilidade da medição da temperatura interna do pasteurizador. Apesar de estes componentes acarretarem numa falha segura do PCC, a confiabilidade dos mesmos deve ser aumentada, de acordo com as exigências da Norma ISO 22.000 de melhoria contínua do sistema de gestão e PPR adequados.

Verifica-se então a importância de se realizar modificações na malha de controle da temperatura interna do pasteurizador, principalmente nos componentes de medição e controle, pois estes são as principais fontes de modos falhas perigosas do PCC.

### **V.3 Melhoria da confiabilidade do PCC-03-02**

As discussões apresentadas na seção anterior mostram que a confiabilidade do PCC-03-02 deve ser aumentada por dois propósitos:

- Redução do número de possíveis falhas dos equipamentos, acarretando em uma redução da incidência de falhas do PCC;
- Redução da probabilidade de falhas perigosas, acarretando em uma medição altamente confiável da falha de um PCC.

A princípio pode-se alcançar um aumento na confiabilidade de um sistema pela modificação da configuração dos componentes (por exemplo, utilizando redundância ativa) ou pelo aumento da confiabilidade dos componentes do sistema (programas de manutenção preventiva, intervalos de testes, etc.).

A modificação da configuração dos componentes é a medida menos custosa, quando se consideram somente componentes de baixo custo (em relação ao custo do processo), como instrumentos de medição, válvulas, entre outros. Por exemplo, a aplicação de redundância ativa tem como pressuposto a instalação de mais um componente no sistema, ou seja, deve-se comprar mais um componente. Sendo assim, quando são considerados componentes de alto custo, a aplicação de redundância ativa pode não ter um bom custo-benefício.



Durante a etapa de projeto de um processo, as modificações físicas do sistema (como a instalação de um novo equipamento) são facilmente realizadas, pois os equipamentos, linhas, válvulas, etc. ainda não existem. Estas modificações são então apenas hipotéticas e também é possível adequar o local onde serão instalados os equipamentos para que seja possível comportar os mesmos. Por outro lado, para uma instalação já existente, tais mudanças físicas são mais complicadas de serem feitas devido aos seguintes fatores:

- Integração com as linhas envolvidas no processo;
- Instalação de novas linhas, válvulas, etc.;
- Instalação de novo sistema eletrônico para integração com as malhas de controle e instrumentação;
- Divisão da respectiva carga entre o equipamento antigo e os novos;
- Espaço físico disponível;
- Entre outros.

As plantas industriais de processamento de alimentos, em sua maioria, infelizmente não possuem estudos de confiabilidade e, por serem instalações já existentes, a realização de modificações físicas é dificultada.

Sendo assim, pode-se considerar que a estratégia mais viável, para o cenário atual das plantas industriais processadoras de alimentos, é aumentar a eficiência dos programas de manutenção preventiva dos equipamentos de grande porte, avaliar modificações físicas das partes internas de equipamentos complexos, visando obter configurações redundantes e de alta confiabilidade, e estudar a instalação de possíveis configurações redundantes dos componentes das malhas de controle e instrumentação, já que estes componentes são de baixo custo em relação ao custo total do processo.

Dos componentes listados na [Tabela 1](#), pode-se considerar que a caldeira elétrica é o componente mais oneroso. Além disso, conforme discutido anteriormente na [Seção V.2.2](#), a caldeira elétrica não é um componente simples, que apresenta diversos elementos e dispositivos internos. Uma avaliação mais detalhada da confiabilidade da caldeira poderia levar a possíveis recomendações para modificar a configuração das partes internas deste equipamento.

Por exemplo, é pressuposto do estudo de confiabilidade do PCC-03-02 que os quatro resistores elétricos atuam como apenas um só, de capacidade quatro vezes maior. Porém, sabe-se que estes resistores são elementos redundantes, fazendo com que a confiabilidade da caldeira seja maior. Se um resistor parar de funcionar adequadamente, os outros três



continuarão a geração de vapor. No entanto, os fenômenos relativos à divisão de carga devem ser considerados para que o estudo de confiabilidade dos resistores seja fidedigno. Outro possível evento seria a falha da alimentação de água de processo devido à falha na malha de controle do nível da caldeira. Para este caso, uma avaliação de possíveis configurações em redundância é viável.

Conclui-se então que as malhas de controle da temperatura interna do pasteurizador e do nível de água de processo na caldeira podem ter sua confiabilidade aumentada supondo modificações na configuração de seus componentes. A estratégia de redundância ativa será aplicada para estas duas malhas a seguir.

### V.3.1 Malha de controle do nível da água na caldeira elétrica

Os componentes relativos ao controle do nível da água de processo na caldeira elétrica são dados pelo transmissor de nível (LT), válvula de controle (VC) e a válvula de alívio (VA). Na [Tabela 1](#) são apresentados os dados de taxa de falha destes componentes. Utilizando o modelo de taxa de falha constante, a [Equação 17](#) pode ser utilizada para calcular a confiabilidade da malha de controle do nível. Na [Figura 24](#) é apresentada a confiabilidade desta malha em função do tempo.

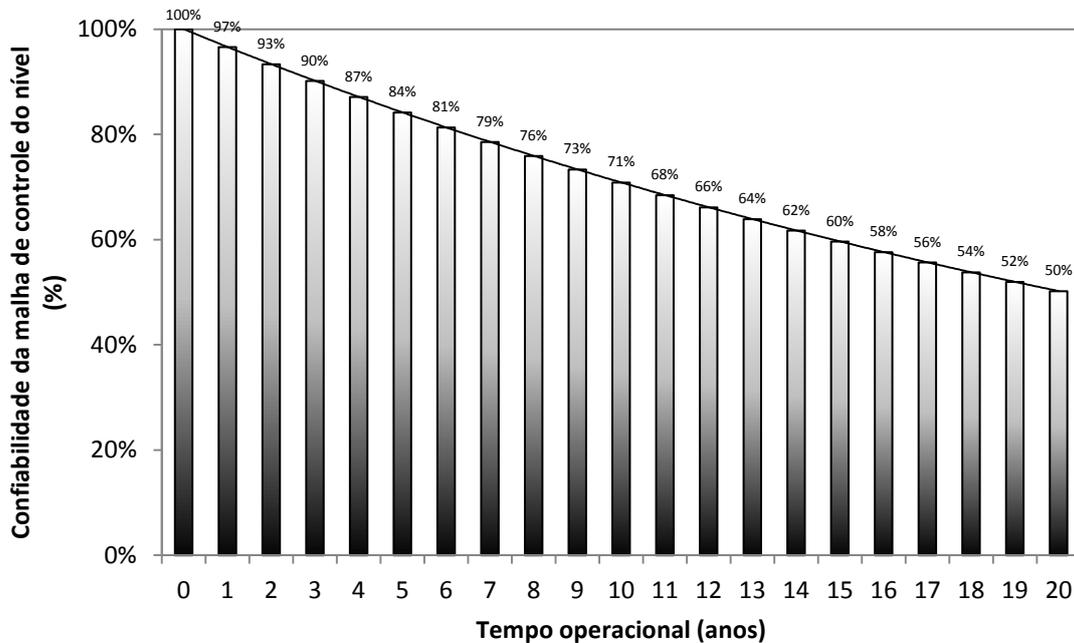


Figura 24 – Confiabilidade da malha de controle do nível da caldeira em função do tempo.



Verifica-se um decaimento lento, porém considerável da confiabilidade da malha. O valor encontrado para o MTTF foi de 29,03 anos. Para o tempo de 6,64 anos, valor correspondente ao MTTF do sistema do PCC-03-02, a confiabilidade da malha é de 79,55% (ou a probabilidade de falha é de 21,45%).

Agora, aplicando a estratégia de redundância ativa, devem ser escolhidos quais componentes serão primeiramente postos em redundância até que se atinja um critério de aceitação para a confiabilidade da malha. Uma heurística é decidir em primeiro lugar pelo componente que possui maior taxa de falha<sup>[7]</sup>.

Dos três componentes da malha de controle do nível, a válvula de controle é o componente que tem a maior taxa de falha, devendo este ser escolhido para ser utilizado em uma primeira configuração redundante. No entanto, a hipótese da instalação de uma válvula, mesmo em uma etapa de projeto, resultaria na instalação de novas linhas e conexões com os equipamentos do processo, o que pode inviabilizar a aplicação de sua redundância. Logo, decidiu-se por utilizar transmissores de nível na primeira configuração em redundância ativa.

Segundo as informações apresentadas na [Seção II.3.3.1](#), existe um limite máximo recomendado de componentes iguais que devem operar em paralelo devido ao balanceamento entre o efeito de aumento da confiabilidade, causado pela configuração em redundância ativa, e o efeito de redução da confiabilidade, causado pelo aumento relativo da probabilidade de eventos de falhas em comum, onde todos os componentes falhariam simultaneamente. Concluiu-se que devem ser utilizados no máximo três componentes em redundância ativa.

Voltando agora a estratégia de redundância, utilizando-se a [Equação 46](#), é possível obter uma expressão matemática para a confiabilidade de um sistema com N componentes em paralelo. Para um sistema composto por dois transmissores de nível em paralelo, a seguinte expressão é obtida:

$$R_{LT,a(2)}(t) = 2R_{LT}(t) - [R_{LT}(t)]^2$$

E para um sistema composto por três transmissores de nível em paralelo:

$$R_{LT,a(3)}(t) = 3R_{LT}(t) - 3[R_{LT}(t)]^2 + [R_{LT}(t)]^3$$



Utilizando-se a [Equação 28](#), é possível calcular a confiabilidade da malha de controle do nível de água na caldeira, onde este sistema é composto, em série, pelo subsistema dos transmissores de nível em paralelo ( $R_{LT,a(N)}$ ), pela válvula de controle ( $R_{VC}$ ) e pela válvula de alívio ( $R_{VA}$ ):

$$R_{\#Nivel}(t) = R_{LT,a(N)}(t)R_{VC}(t)R_{VA}(t)$$

Onde o subscrito  $a(N)$  indica uma configuração em redundância ativa composta por  $N$  componentes. Utilizando-se a [Equação 48](#) para calcular o MTTF do subsistema  $R_{LT,a(N)}$  e a [Equação 30](#) para se calcular o MTTF da malha como um todo ( $R_{\#Nivel}$ ), são encontrados valores iguais a 31,96 anos para  $R_{\#Nivel}$ , tendo em sua composição o subsistema  $R_{LT,a(2)}$ , e 33,17 anos para  $R_{\#Nivel}$ , tendo em sua composição o subsistema  $R_{LT,a(3)}$ . Isto mostra que a utilização de três transmissores em paralelo acarreta em um possível aumento no tempo de vida útil do sistema de aproximadamente um ano. O valor encontrado para o MTTF da malha simples (tendo em sua composição o subsistema  $R_{LT,a(1)}$ ) foi igual a 29,03 anos.

Na figura a seguir é apresentada a evolução da confiabilidade da malha de controle do nível da caldeira utilizando-se diferentes subsistemas de transmissores de nível em configuração 1/1, 1/2 e 1/3.

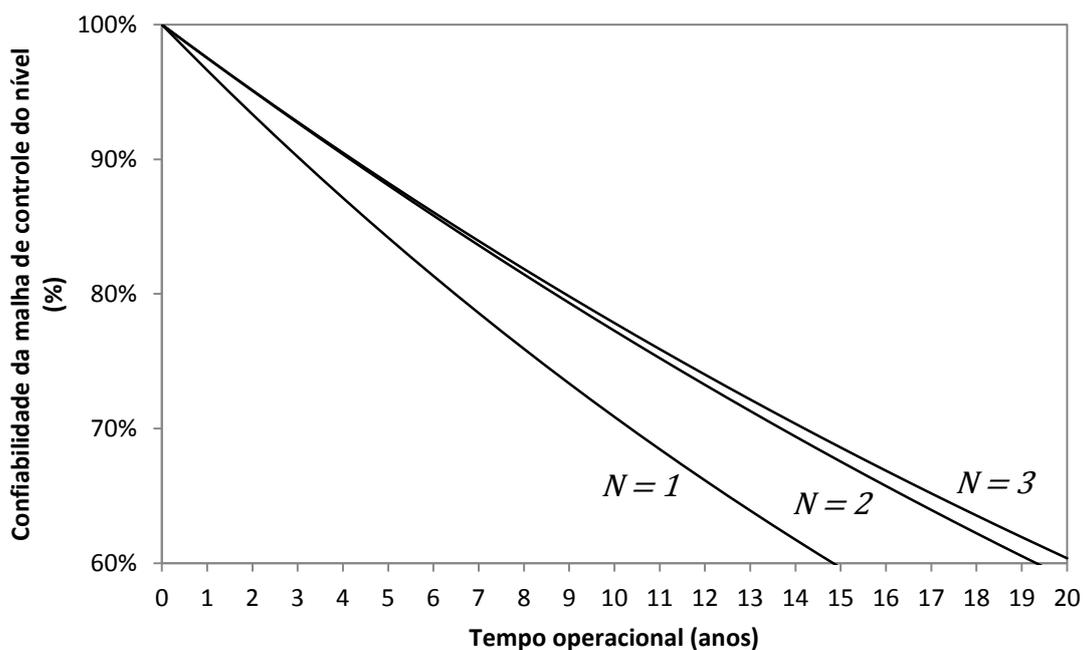


Figura 25 – Efeito dos subsistemas de  $N$  transmissores de nível em paralelo na confiabilidade da malha de controle do nível da caldeira.



Diferentemente da conclusão obtida ao se comparar os valores encontrados para o MTTF, pode-se notar que os subsistemas  $R_{LT,a(2)}$  e  $R_{LT,a(3)}$  não possuem diferença significativa entre si na confiabilidade da malha, sendo possível até descartar a hipótese de se utilizar três transmissores em paralelo. Para um tempo operacional de 6,64 anos, valor correspondente ao MTTF do sistema do PCC-03-02, a confiabilidade da malha aumenta de 79,55% para 84,40%, quando se utiliza  $R_{LT,a(2)}$ , e para 84,70%, quando se utiliza  $R_{LT,a(3)}$ .

Este aumento de aproximadamente 5%, apesar de parecer pequeno, é um ganho significativo, pois este ganho é cumulativo quando são utilizados mais subsistemas com componentes em redundância. A próxima etapa da estratégia seria supor a utilização de mais subsistemas em paralelo, compostos pelos demais componentes da malha. A princípio, quando todos os componentes da malha forem substituídos por subsistemas redundantes, a confiabilidade da malha irá aumentar consideravelmente.

Isto pode ser verificado na figura a seguir, onde é apresentada a evolução da confiabilidade da malha de controle do nível da caldeira para o sistema simples, para o sistema  $LT_{1/2}-VC_{1/2}-VA_{1/2}$ , e para o sistema  $LT_{1/3}-VC_{1/3}-VA_{1/3}$ .

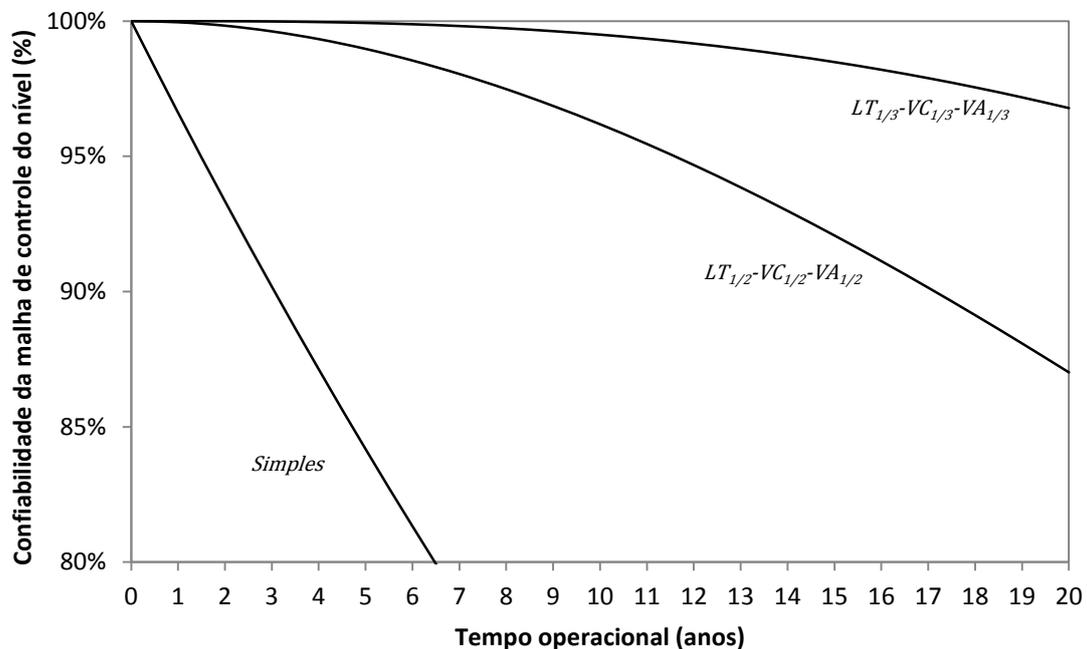


Figura 26 – Aumento da confiabilidade da malha de controle do nível da caldeira com a substituição dos componentes por subsistemas em redundância ativa 1/N.



Verifica-se que a substituição de todos os componentes por subsistemas em redundância ativa aumenta significativamente a confiabilidade da malha. Ainda mais, as configurações  $LT_{1/2}-VC_{1/2}-VA_{1/2}$  e  $LT_{1/3}-VC_{1/3}-VA_{1/3}$  possuem diferença significativa entre si na confiabilidade da malha, onde, para um tempo operacional de 20 anos, a primeira configuração apresenta 87,01% de confiabilidade enquanto que a segunda configuração apresenta 96,78%. Os valores encontrados para o MTTF foram de 43,55 anos e de 53,22 anos para a primeira e para a segunda configuração, respectivamente. Para um tempo operacional de 6,64 anos, valor correspondente ao MTTF do sistema do PCC-03-02, a configuração  $LT_{1/2}-VC_{1/2}-VA_{1/2}$  apresenta confiabilidade de 98,47% e a configuração  $LT_{1/3}-VC_{1/3}-VA_{1/3}$  confiabilidade de 99,88%, valores muito altos.

Agora, introduzindo os efeitos de modos de falhas em comum, a probabilidade de falha destes eventos pode ser avaliada conforme discutido anteriormente, pela introdução de uma função exponencial característica. Para se avaliar este efeito na redução da confiabilidade da malha, deve-se avaliar o fator  $\beta$  de cada componente da malha. Como a malha possui três componentes distintos, existem três fatores  $\beta$ . Estes fatores serão denominados  $\beta_{LT}$ ,  $\beta_{VC}$  e  $\beta_{VA}$ , onde os subscritos são as siglas de quais componentes cada fator está relacionado.

A expressão que representa a confiabilidade da malha, com a introdução da correção devido aos eventos de falha em comum, pode ser escrita em termos das confiabilidades dos subsistemas em redundância ativa ( $R_{i,a(N)}$ ) e das confiabilidades dos “componentes hipotéticos” ( $R'_i$ ). Esta expressão é dada então por:

$$R'_{\#Nivel}(t) = [R_{LT,a(3)}(t)R_{VC,a(3)}(t)R_{VA,a(3)}(t)] \cdot [R'_{LT}(t)R'_{VC}(t)R'_{VA}(t)]$$

Agora, supondo um valor igual para o fator  $\beta$  dos três componentes, dado por 0,1 (ou seja, a taxa de falha em comum corresponde a 10% da taxa de falha total de cada componente), pode-se realizar uma comparação entre a confiabilidade da malha corrigida ( $R'_{\#Nivel}$ ) e a confiabilidade da malha ideal ( $R_{\#Nivel}$ ). Na figura a seguir é apresentado o comportamento da confiabilidade da malha corrigida e da malha ideal com o tempo para as configurações  $LT_{1/2}-VC_{1/2}-VA_{1/2}$  e  $LT_{1/3}-VC_{1/3}-VA_{1/3}$ . Foram usadas as denominações  $LT'_{1/2}-VC'_{1/2}-VA'_{1/2}$  e  $LT'_{1/3}-VC'_{1/3}-VA'_{1/3}$  para configurações das malhas corrigidas.

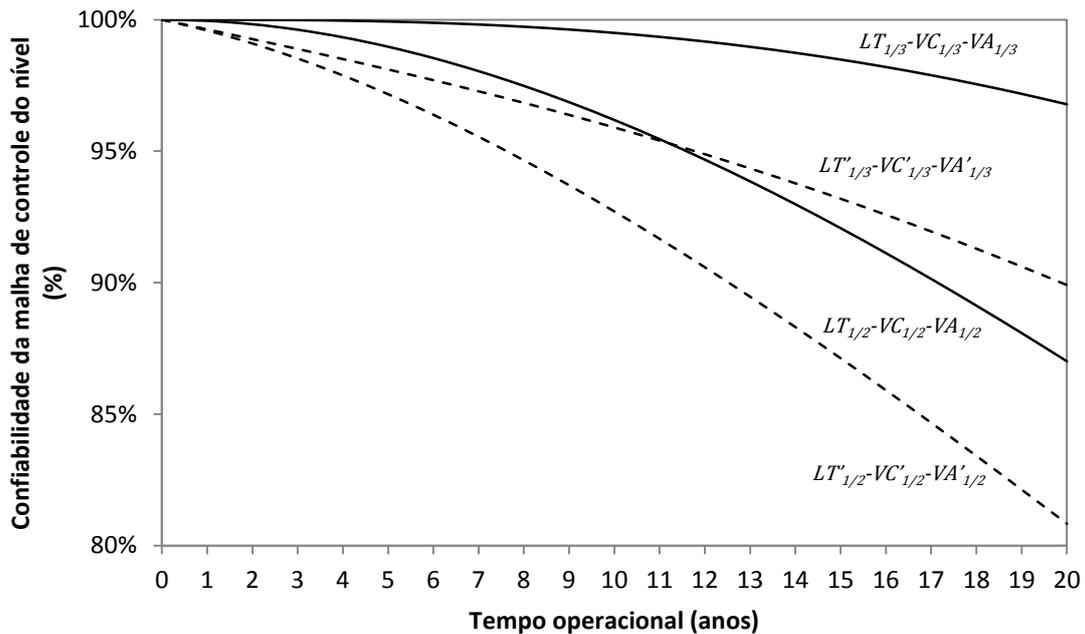


Figura 27 – Redução da confiabilidade de configurações em redundância ativa 1/N devido ao efeito dos eventos de falha em comum.

Pode-se verificar pela figura que há uma redução expressiva da confiabilidade das malhas corrigidas e que esta redução fica mais acentuada para maiores valores do tempo operacional. Os valores encontrados para o MTTF das malhas  $LT'_{1/2}-VC'_{1/2}-VA'_{1/2}$  e  $LT'_{1/3}-VC'_{1/3}-VA'_{1/3}$  foram de 37,32 anos e de 44,22 anos, respectivamente. Para um tempo operacional de 6,64 anos, valor correspondente ao MTTF do sistema do PCC-03-02, a primeira configuração apresenta confiabilidade de 95,86% e a segunda configuração confiabilidade de 97,43%, estes ainda sendo valores muito altos mesmo com a introdução de eventos de falha em comum.

Para uma vida útil estimada de aproximadamente 20 anos da instalação do PCC, verifica-se que a configuração  $LT'_{1/3}-VC'_{1/3}-VA'_{1/3}$  apresentaria confiabilidade de 89,65%, um valor relativamente bom para uma malha que operou 20 anos sem nenhum tipo de manutenção ou substituição de componentes. Além disso, o MTTF desta configuração é superior a 20 anos, isto é, a malha só teria chances razoáveis de apresentar falha após este período de tempo. Isto é, sem dúvidas, uma constatação de que a utilização da configuração  $LT'_{1/3}-VC'_{1/3}-VA'_{1/3}$  é confiável durante o tempo de vida útil da instalação do PCC.



### V.3.1.1 Resumo da melhoria da malha de controle do nível de água de processo na caldeira e recomendações

Na figura a seguir é apresentada a evolução da confiabilidade da malha de controle do nível na caldeira, com o tempo, para a configuração original e a configuração  $LT'_{1/3}$ - $VC'_{1/3}$ - $VA'_{1/3}$  (com  $\beta_{LT}$ ,  $\beta_{VC}$  e  $\beta_{VA}$  iguais a 10%), esta sendo uma recomendação para o aumento da confiabilidade da malha.

O valor do MTTF para a configuração original é de 29,03 anos e para a configuração recomendada é de 44,22 anos. O aumento do MTTF é de 52,31%. Apesar do MTTF da configuração original ser maior do que o tempo de vida útil estimado da instalação do PCC, sua confiabilidade seria inferior a 80% após aproximadamente seis anos de operação. Pode-se considerar que este valor para a confiabilidade de uma malha de controle não é apropriado já que malhas de controle são responsáveis pela manutenção das condições normais de operação de um processo.

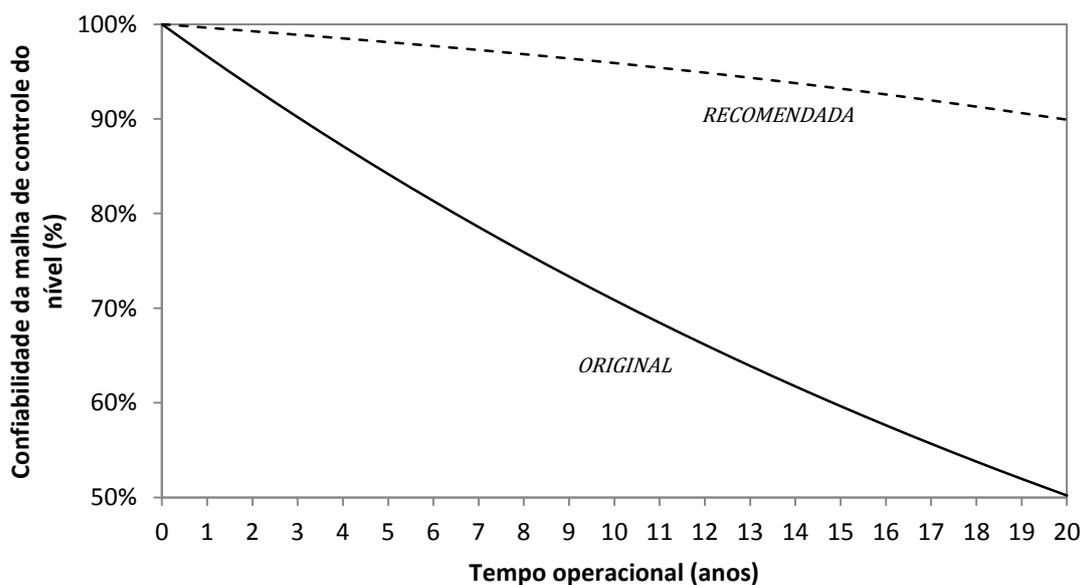


Figura 28 – Confiabilidade da malha de controle do nível na caldeira para a configuração original e a configuração recomendada pelo estudo.

A falha frequente da malha poderia ocasionar distúrbios no processo, o que poderia acarretar na falha do PCC. Por isso, recomenda-se a configuração redundante, com o objetivo de aumentar a confiabilidade da malha e garantir a operação adequada do PCC, além de que, a malha é composta por componentes relativamente baratos quando comparados com a caldeira elétrica e o pasteurizador.



A configuração recomendada apresenta uma confiabilidade de 89,65% após 20 anos de operação. Se for adotado como critério de tolerabilidade para malhas de controle uma confiabilidade de 90% ao final do tempo de vida útil do processo, então esta configuração não atenderia tal critério. No entanto, a realização de manutenção preventiva e testes de desempenho da malha acarretaria em um aumento de sua confiabilidade e com certeza o critério de 90% seria atendido. Conclui-se então que a utilização da configuração recomendada é capaz de atender as expectativas do PCC.

Na [Figura 29](#) é apresentado o P&ID do subsistema da configuração recomendada para a malha de controle do nível de água de processo na caldeira.

As próximas estratégias para promover o aumento da confiabilidade da malha seriam a identificação e eliminação de possíveis modos de falha em comum, o que acarretaria na redução de  $\beta_{LT}$ ,  $\beta_{VC}$  e  $\beta_{VA}$  com consequente aumento da confiabilidade da malha. É importante também garantir que os programas de manutenção preventiva e testes de desempenhos sejam eficazes.

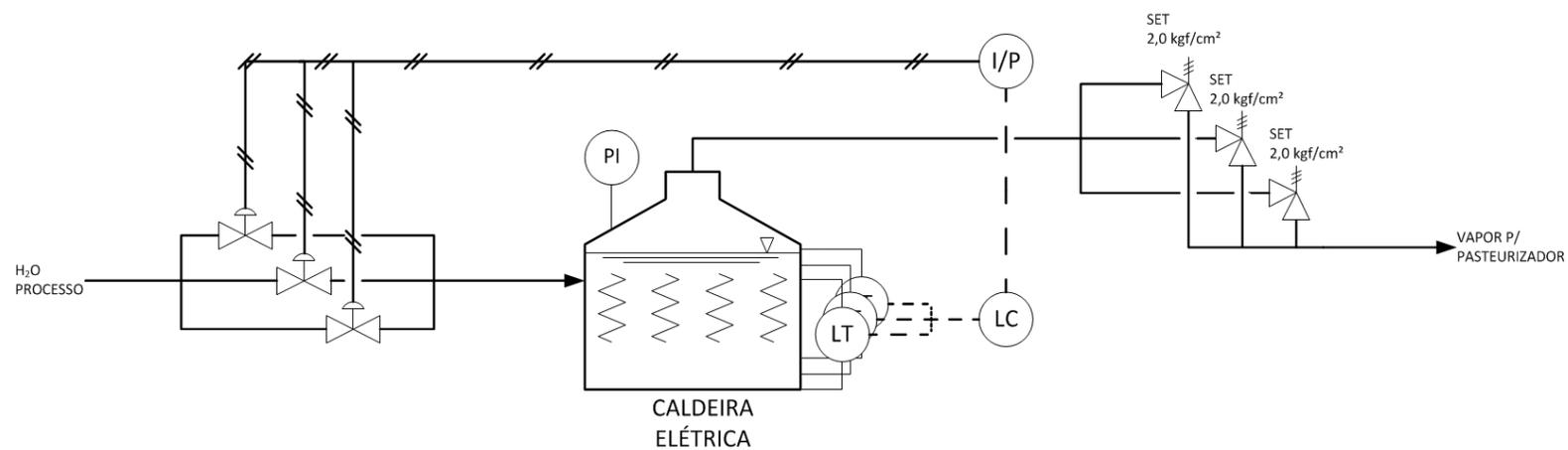


Figura 29 – Fluxograma P&ID da configuração recomendada para a malha de controle do nível de água de processo na caldeira.



## V.3.2 Malha de controle da temperatura interna do pasteurizador

### V.3.2.1 Confiabilidade da medição da temperatura interna do pasteurizador

Na [Seção V.2.2](#), foi apresentada uma avaliação da confiabilidade do transmissor de temperatura (TIT) instalado no pasteurizador, para o processo do PCC-03-02. Foi concluído que o TIT tinha um percentual de importância igual a 7,73% na probabilidade de falha do sistema, após um valor para o tempo operacional igual ao MTTF do PCC-03-02 (6,64 anos). Este é um valor relativamente alto para uma falha em que o desvio do limite crítico passaria despercebido (falha perigosa). Após 6,64 anos de operação do processo, a probabilidade de falha calculada para o TIT foi de 6,09%.

Na [Figura 22](#), foi apresentada a evolução da confiabilidade do TIT com o decorrer do tempo operacional. De acordo com a figura, este componente a princípio possui uma confiabilidade relativamente alta. No entanto, pode-se considerar que a evolução de sua confiabilidade com o tempo não é aceitável para um componente diretamente relacionado a falhas perigosas de um PCC.

Deseja-se então atribuir um critério de tolerabilidade para a falha perigosa do PCC-03-02, já que uma probabilidade de falha nula não é possível de ser obtida. Para tal, serão utilizados os conceitos de Probabilidade de deterioração (*spoilage probability*)<sup>[17]</sup> como um auxílio para o desenvolvimento e definição deste critério.

A probabilidade de deterioração pode ser definida como a probabilidade de se encontrar embalagens contaminadas por microrganismos dentro de um lote que passou por um processo de esterilização comercial<sup>[17]</sup>. Esta probabilidade pode ser expressa matematicamente por:

$$p = \frac{n}{r}$$

Onde  $p$  representa a probabilidade de deterioração,  $r$  representa o número total de embalagens processadas em um lote e  $n$  representa o número de embalagens contaminadas. Sendo assim, muitas empresas, quando utilizam o processo de esterilização comercial, possuem como critério de tolerabilidade um valor estabelecido para  $p$ . Por exemplo, um valor igual a  $1 \cdot 10^{-5}$  indica que para cada 100.000 embalagens de um lote, uma estará contaminada.



Analogamente a esta probabilidade, pode-se definir um critério de tolerabilidade para a falha perigosa de um PCC. Uma medida conservativa seria considerar que um evento de falha perigosa deve ter uma probabilidade de no máximo 1%. Com isso, a confiabilidade de um sistema onde podem ocorrer tais eventos deve ser no mínimo igual a 99%. Além disso, se é assumido que não é aplicado nenhum tipo de manutenção, intervalo de testes, etc., então este sistema deve apresentar 99% de confiabilidade ao final do tempo de vida útil do processo do PCC.

Se for possível utilizar o modelo de taxa de falha constante, é possível obter um valor para a taxa de falha máxima ( $\lambda_{MAX}$ ) que a instrumentação de medição pode ter. Pela [Equação 8](#) e pela [Equação 17](#), obtêm-se a seguinte expressão para  $\lambda_{MAX}$ :

$$\lambda_{MAX} = \frac{1}{T} \cdot \ln \left[ \frac{1}{1 - F(T)} \right]$$

Equação 51

Onde  $T$  representa o período de tempo operacional (geralmente, a vida útil do processo do PCC) e  $F(T)$  representa a probabilidade do evento de falha perigosa após o período de tempo  $T$ . Como antes, se for considerado um valor para esta probabilidade de 1% e considerando também um tempo operacional de 20 anos, o valor encontrado para a taxa de falha máxima é dado por:

$$\lambda_{MAX} = \frac{1}{20 \text{ anos}} \cdot \ln \left[ \frac{1}{1 - 0,01} \right] = 5,025 \cdot 10^{-4} \text{ ano}^{-1}$$

Convertendo este valor para unidades de horas operacionais (de acordo com a jornada de trabalho da Nápoles), utiliza-se a seguinte expressão:

$$[h] = [ano] \cdot 12 \frac{[meses]}{[ano]} \cdot 22 \frac{[dias]}{[mês]} \cdot 8 \frac{[h]}{[dia]}$$

E o valor encontrado para taxa de falha máxima, em  $h^{-1}$ , é dado por:

$$\lambda_{MAX} = 2,38 \cdot 10^{-7} h^{-1}$$



Agora, se  $r$  representar a quantidade de produto, em quilogramas, produzida em toda a vida útil do processo e supondo uma capacidade ( $\dot{m}$ ) de 100 kg/h do processo,  $r$  pode ser expresso matematicamente por:

$$r = \frac{\dot{m}}{\lambda_{MAX}} = \frac{100}{2,38 \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{kg \cdot h^{-1}}{h} \approx 4,2 \cdot 10^8 kg$$

Logo, o valor correspondente para a probabilidade de deterioração, para  $n = 1$  (considerando que somente um quilograma de produto deve ser produzido com contaminação), é dado por:

$$p = \frac{1}{r} = \frac{\lambda_{MAX}}{\dot{m}} = \frac{2,38 \cdot 10^{-7}}{100} = 2,38 \cdot 10^{-9}$$

Este resultado indica que serão produzidos 2,38 kg de produto contaminado para cada 1.000 toneladas. Este é um resultado bastante conservativo.

Agora, sabendo que a medição da temperatura interna do pasteurizador deve ter alta confiabilidade, para que a probabilidade de eventos de falha perigosa do PCC seja muito baixa, deve-se então avaliar possíveis configurações dos transmissores de temperatura para obter-se a confiabilidade desejada. Para isto, deve ser adotada também aqui a estratégia de redundância ativa. Utilizando-se a [Equação 46](#), é possível obter uma expressão matemática para a confiabilidade de um subsistema com  $N$  transmissores de temperatura em paralelo. Para dois transmissores de temperatura em paralelo, esta expressão é dada então por:

$$R_{TIT,a(2)}(t) = 2R_{TIT}(t) - [R_{TIT}(t)]^2$$

E para um subsistema composto por três TITs em paralelo:

$$R_{TIT,a(3)}(t) = 3R_{TIT}(t) - 3[R_{TIT}(t)]^2 + [R_{TIT}(t)]^3$$

Na figura a seguir é apresentada a evolução da confiabilidade de um subsistema composto por transmissores de temperatura para as configurações em redundância ativa 1/1, 1/2 e 1/3.

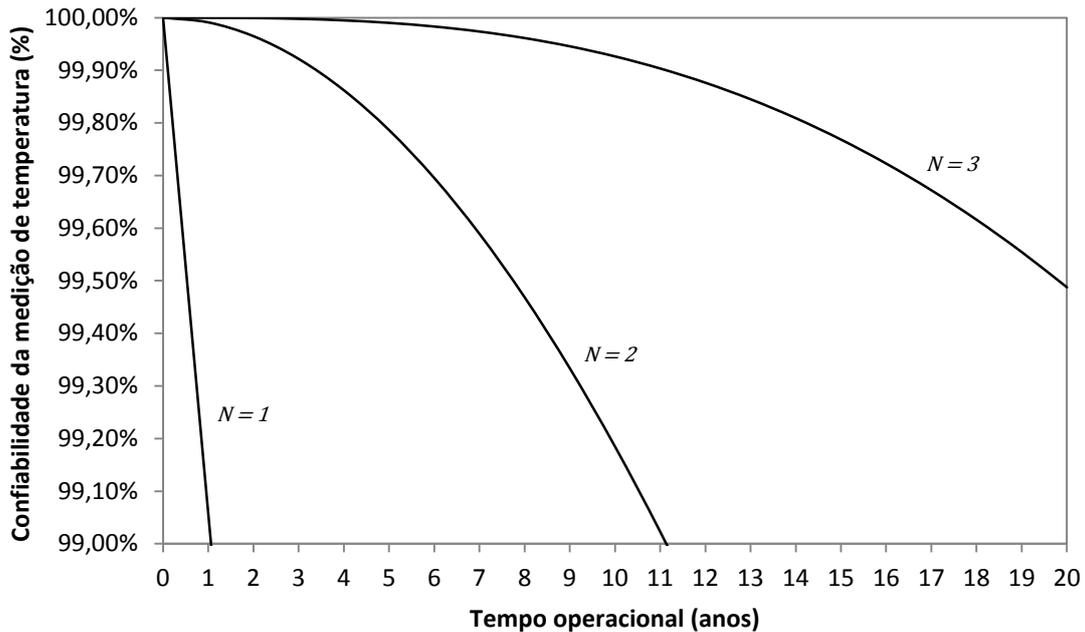


Figura 30 – Efeito dos subsistemas de N transmissores de temperatura em paralelo na confiabilidade da medição da temperatura interna do pasteurizador.

Verifica-se pela figura que somente a configuração em redundância ativa 1/3 é capaz de atender ao critério de tolerabilidade (dado por uma probabilidade de falha na medição de no máximo 1%). Sendo assim, recomenda-se a instalação de mais dois transmissores de temperatura no pasteurizador e respectiva integração com a malha de controle. O valor encontrado para o MTTF da configuração 1/3 foi de 193,76 anos.

No entanto, não foi contemplada nesta avaliação preliminar a possibilidade da ocorrência de eventos de falha em comum (introdução de um “componente hipotético” e do fator  $\beta$ ). Talvez possa acontecer que, com a introdução do efeito destes eventos, a confiabilidade dos transmissores em configuração 1/3 não seja superior a 99%.

Realizando tal introdução para corrigir a confiabilidade da medição, analogamente a malha de controle do nível na caldeira, onde se utilizou a [Equação 50](#), e supondo um valor para  $\beta_{TIT}$  igual a 0,1, é possível verificar o efeito dos eventos de falha em comum na redução da confiabilidade da medição da temperatura interna do pasteurizador. Na figura a seguir é apresentado este efeito para a configuração dos transmissores em redundância ativa 1/3 ( $TIT_{1/3}$ ). Foi usada a denominação  $TIT'_{1/3}$  para representar a confiabilidade da medição corrigida.

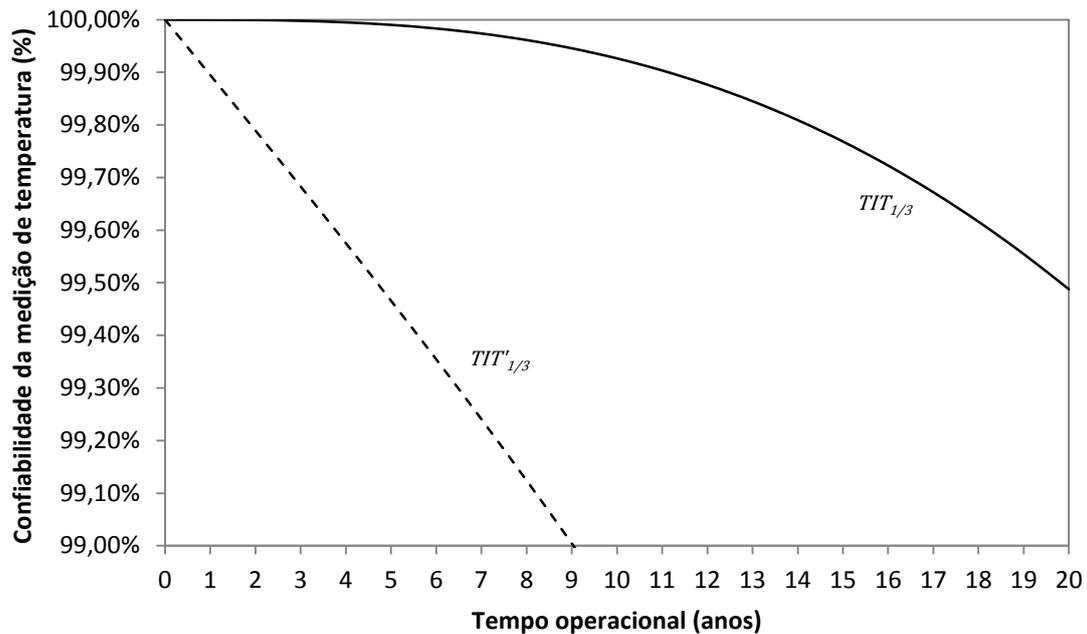


Figura 31 – Redução da confiabilidade da medição da temperatura interna do pasteurizador devido ao efeito de eventos de falha em comum.

Verifica-se pela figura que, com a introdução do efeito de eventos de falha em comum, utilizando-se o valor de 0,1 para o fator  $\beta_{TIT}$ , a configuração  $TIT'_{1/3}$  não é mais capaz de atender ao critério de tolerabilidade adotado. Logo, um estudo para se identificar e eliminar possíveis modos de falha em comum dos transmissores de temperatura deve ser realizado para que se obtenha a confiabilidade necessária para atender ao critério de tolerabilidade.

Agora, deseja-se calcular o valor máximo de  $\beta_{TIT}$  para o qual a confiabilidade da medição seja de no mínimo 99%. Sabendo que o tempo operacional que correspondente ao menor valor da confiabilidade é de 20 anos (vida útil do processo) e utilizando a [Equação 50](#), o valor máximo encontrado para  $\beta_{TIT}$  é de 0,0253, ou seja, que a taxa de falha em comum deve corresponder a 2,53% da taxa de falha total do TIT.

Este é um percentual relativamente baixo para eventos de falha em comum. Como discutido anteriormente, deve-se identificar e eliminar possíveis modos de falha em comum dos transmissores. Alguns possíveis modos são: falha do painel elétrico que alimenta os transmissores, falha por desgaste da fiação elétrica que interliga os transmissores, entre outros. Uma documentação detalhada sobre os TITs, contemplando a realização de uma manutenção preventiva mais rigorosa e a redução dos intervalos de testes seria uma ferramenta bastante útil para um sistema de gestão de segurança dos alimentos.



Uma observação importante deve ser feita.. A realização de manutenção preventiva e de testes de desempenho em intervalos específicos iria acarretar no aumento da confiabilidade. Sendo assim, tendo-se a esperança de que a confiabilidade da medição seria maior com a aplicação de tais medidas, poderiam ser utilizados transmissores de temperatura menos confiáveis ou até não se pensar em utilizar uma configuração redundante.

Entretanto, manutenção preventiva e testes de desempenho são feitos por funcionários, os quais se forem comparados como componentes de um sistema (no caso, um sistema de gestão), também podem falhar no desempenho de suas tarefas, isto é, possuem uma probabilidade de falha. Apesar de esta comparação parecer simples, a estimativa da probabilidade de uma pessoa falhar ao desempenhar uma tarefa é muito complexa, onde aspectos como psicologia comportamental, qualificação, etc. devem ser avaliados. Este tipo de estudo é denominado Confiabilidade Humana<sup>[7]</sup>.

Sendo assim, não necessariamente a realização da manutenção de um equipamento ou instrumento será eficiente, podendo às vezes até ocorrer uma manutenção inadequada que acarretaria em uma redução da confiabilidade e não no aumento. Um teste de desempenho mal feito para um instrumento de medição pode acarretar na permissão da continuidade de um processo e em seguida ocorrer falha na medição, conseqüentemente ocorrer falha do processo. Para um PCC, esta falha poderia passar despercebida, sendo caracterizada como uma falha perigosa.

Logo, existe um dilema entre a confiabilidade de uma máquina ou instrumento e a confiabilidade de uma pessoa. É possível verificar que a confiabilidade de uma máquina será sempre maior que de uma pessoa, quando se admite que cada um desempenhe a mesma função.

Conclui-se então que, para um estudo de confiabilidade de malhas de instrumentação responsáveis pela medição de um desvio do PCC, uma estratégia conservativa seria a avaliação de sua confiabilidade, considerando que nenhum tipo de manutenção ou testes de desempenho será efetuado em toda a vida útil do processo do PCC. Isto acarretaria em uma segurança maior da produção do alimento. No entanto, durante a operação do PCC, é recomendada a realização de manutenção e testes de desempenho destas malhas, visando a maior redução possível da probabilidade de falha perigosa (falha na detecção dos desvios de um PCC).



No entanto, verifica-se que a malha de controle da temperatura interna do pasteurizador não é composta somente por transmissores de temperatura. Logo, deve-se também aumentar a confiabilidade da malha como um todo, já que sua falha frequente acarretaria em frequentes falhas seguras PCC, o que é considerado uma não-conformidade.

Os *switchs* possuem função fundamental na malha de controle da temperatura interna do pasteurizador, dada pelo acionamento dos resistores da caldeira elétrica. Por exemplo, para uma leitura baixa pelo TIT, o TSL deveria fechar a chave do circuito elétrico de acionamento dos resistores. Se ocorresse falha na demanda, então não seria iniciada a geração de vapor com consequente redução da temperatura interna do pasteurizador, acarretando em uma falha segura do PCC (desvio do limite crítico com sucesso de sua detecção). Para o TSH, sua atuação espúria acarretaria na interrupção da geração de vapor, devido ao desligamento dos resistores elétricos, com consequente redução da temperatura interna do pasteurizador, logo acarretando também em uma falha segura do PCC.

Os resistores da caldeira elétrica também compõem a malha de controle da temperatura interna do pasteurizador. De acordo com a [Figura 20](#), os resistores são classificados como o elemento final de controle, ou seja, sua atuação é que irá garantir a manutenção da temperatura de *set-point*. Foi discutido na [Seção V.3](#), que os resistores atuam como elementos redundantes, mas que este tipo de configuração não foi considerado na primeira avaliação da confiabilidade do PCC-03-02. Se for considerada uma configuração 1/4 dos resistores da caldeira, com certeza a confiabilidade da malha de controle da temperatura interna do pasteurizador será maior (e do PCC também).

Nas próximas seções serão apresentados os resultados relativos ao estudo de confiabilidade desta malha de controle levando em consideração uma confiabilidade hipotética dos *switchs* e a configuração em redundância 1/4 dos resistores da caldeira elétrica. Nestes estudos, foi considerada a utilização do subsistema de medição composto por três TITs em redundância ativa 1/3 e considerando um fator  $\beta_{TIT}$  de 2,53% para modelagem do efeito dos eventos de modo de falha em comum.



### V.3.2.2 Introdução dos *switchs* no estudo de confiabilidade

Para que seja possível introduzir os *switchs* no estudo de confiabilidade, devem ser estipulados dados de taxa de falha deste componente. Os principais modos de falha que um *switch* pode apresentar são:

- Falha na demanda;
- Atuação espúria;
- *Input* errado, baixo ou alto;
- Operação atrasada.

Verifica-se que, dos modos de falha listados acima, transmissores apresentam modos de falha semelhantes (Tabela 1), caso seja possível substituir *output* por *input*. Agora, comparando-se um transmissor com o *switch*, é possível perceber que estes instrumentos são semelhantes quanto ao desempenho de sua função, isto é, eles recebem um *input* e enviam um *output*.

Transmissores têm como *input* a medição de uma variável e como *output* o envio de sinal eletrônico proporcional à magnitude da medição, sendo este sinal calibrado de acordo com o *range* apropriado ao processo. *Switchs* têm como *input* o sinal eletrônico proporcional e como *output* a abertura ou fechamento de um circuito elétrico pelo movimento de uma chave. Percebe-se que a diferença reside no momento em que há uma ação “não eletrônica”, onde para o transmissor ocorre no *input* e para o *switch* ocorre no *output*.

Sendo assim, existe a possibilidade de se utilizar os mesmos dados de taxa de falha de transmissores para *switchs*. No entanto, conforme discutido anteriormente, o TSL e o TSH se diferenciam pelos modos de falha na demanda e atuação espúria, respectivamente. Logo, devem ser considerados somente os modos de falha apropriados para cada componente. Utilizando-se o modelo de taxa de falha constante, os valores da taxa de falha para o TSL e o TSH são iguais a  $3,56 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$  e  $3,46 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ , respectivamente.

Agora, utilizando uma configuração em redundância ativa 1/3 tanto para o TSL quanto para o TSH e introduzindo a correção da confiabilidade devido ao efeito dos eventos de modo de falha em comum, onde foi considerando os valores de 10% para  $\beta_{TSL}$  e  $\beta_{TSH}$ , é possível obter uma nova expressão para a confiabilidade da malha de controle da temperatura interna do pasteurizador, sendo esta dada por:



$$R'_{\#Temp}(t) = [R_{TIT,a(3)}(t)R_{TSL,a(3)}(t)R_{TSH,a(3)}(t)R_{RE}(t)] \cdot [R'_{TIT}(t)R'_{TSL}(t)R'_{TSH}(t)]$$

Na expressão anterior, o subscrito “RE” representa a resistência elétrica da caldeira, cuja função confiabilidade leva em consideração apenas a taxa de falha do modo *input* errado. Na figura a seguir é apresentada a evolução da confiabilidade da malha de controle da temperatura interna do pasteurizador original e da malha com a introdução de redundância ativa 1/3 dos *switchs*.

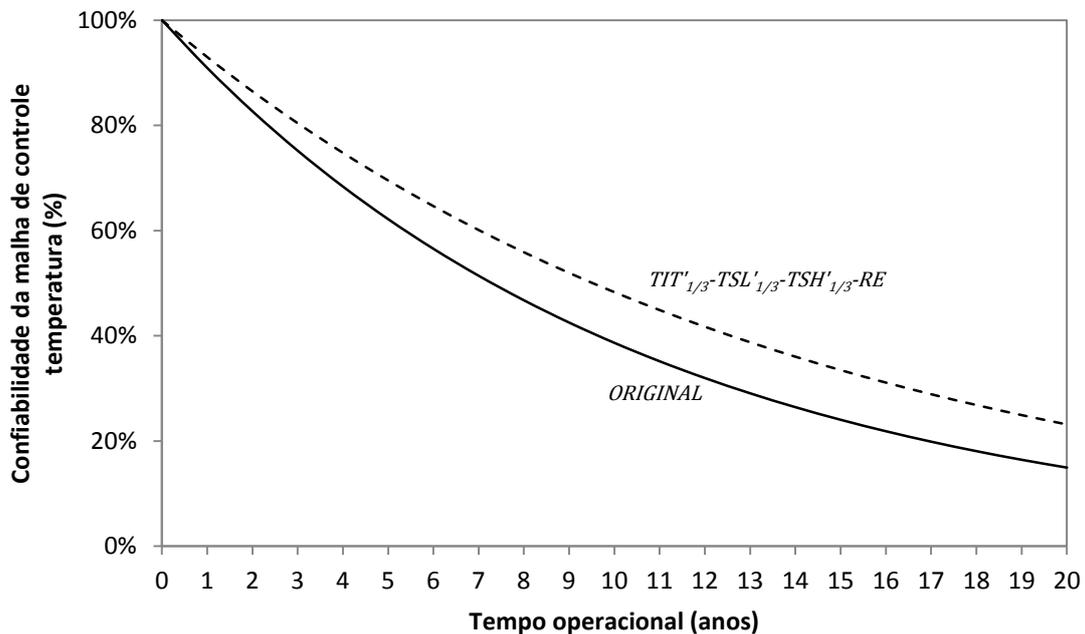


Figura 32–Confiabilidade da malha de controle do nível da caldeira em função do tempo, com a introdução de redundância ativa 1/3 para o TSL e TSH.

Verifica-se pela figura que houve um pequeno aumento da confiabilidade da malha. O valor do MTTF para a configuração original é de 10,52 anos e para a configuração nova é de 11,64 anos. O aumento do MTTF é de 10,65%, um valor não muito expressivo. Para o tempo de 6,64 anos, valor correspondente ao MTTF do sistema do PCC-03-02, a confiabilidade da nova configuração é de 61,70% (ou a probabilidade de falha é de 38,30%).

O valor encontrado para o MTTF da configuração nova não é maior do que o tempo de vida útil estimado da instalação do PCC (de 20 anos), sendo necessária uma avaliação mais detalhada para aumentar o tempo de vida útil da malha e conseqüentemente sua confiabilidade. No entanto, verificando os valores de taxa de falha apresentado na Tabela 1, verifica-se que os resistores elétricos possuem um valor aproximadamente 10 vezes maior que os demais



componentes. Foi afirmado na [Seção V.2.2](#) que a caldeira elétrica é um componente crítico do processo do PCC-03-02 e que seus elementos e dispositivos internos deveriam ser avaliados com maiores detalhes.

É possível que este valor alto para a taxa de falha dos resistores elétricos seja o motivo pelo qual a configuração nova da malha não foi capaz de aumentar expressivamente a confiabilidade da malha. A avaliação de uma configuração composta pelo subsistema de resistores elétricos em redundância ativa 1/4 talvez mostre um aumento expressivo da confiabilidade.

### V.3.2.3 Resistores em redundância ativa 1/4

A partir da configuração nova para a malha de controle da temperatura interna do pasteurizador, elaborada na seção anterior, foi possível obter uma expressão para uma segunda configuração nova desta malha dada por:

$$R'_{\#Temp}(t) = [R_{TIT,a(3)}(t)R_{TSL,a(3)}(t)R_{TSH,a(N)}(t)R_{RE,a(4)}(t)] \cdot [R'_{TIT}(t)R'_{TSL}(t)R'_{TSH}(t)R'_{RE}(t)]$$

Onde, nesta expressão, foi substituída a função representando um resistor elétrico unitário por quatro resistores em redundância ativa 1/4. Na figura a seguir é apresentado o efeito do aumento da confiabilidade para esta segunda nova configuração.

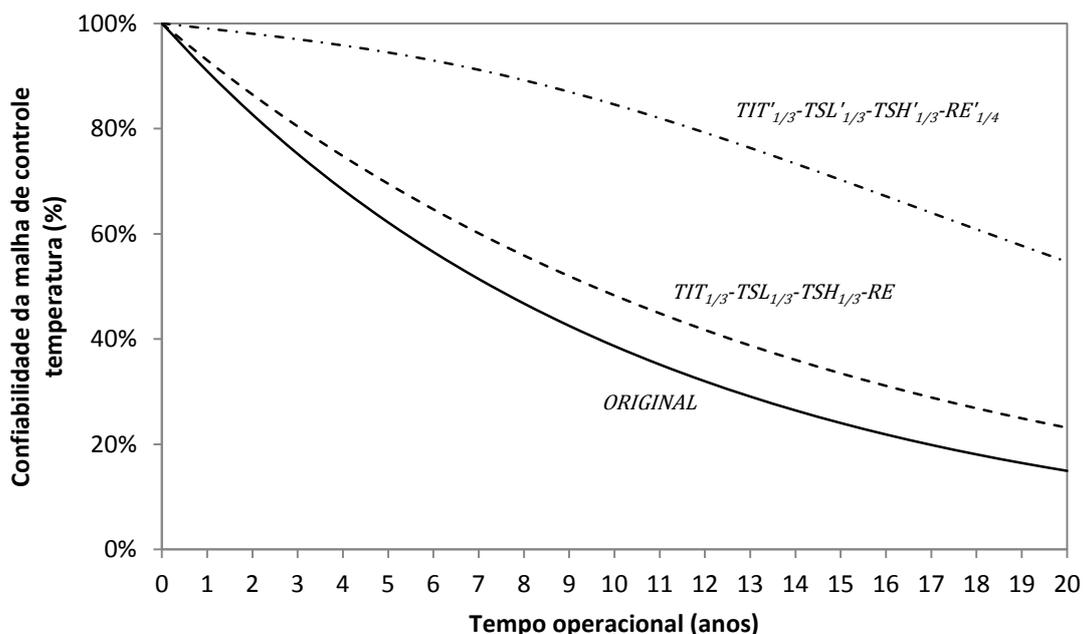


Figura 33 – Aumento da confiabilidade da malha de controle da temperatura interna do pasteurizador devido à introdução de redundância ativa 1/4 para os resistores elétricos.



Verifica-se pela figura que a introdução da redundância ativa 1/4 para os resistores elétricos aumentou expressivamente a confiabilidade da malha. Ainda mais, nota-se que o comportamento de decaimento desta segunda nova configuração é bem mais lento que das demais, onde uma confiabilidade superior a 90% é obtida até sete anos de operação. O valor encontrado para o MTTF desta segunda nova configuração foi de 17,56 anos, valor inferior ao tempo de vida útil da instalação do PCC. Para o tempo de 6,64 anos, valor correspondente ao MTTF do sistema do PCC-03-02, a confiabilidade da nova configuração é de 91,84% (ou a probabilidade de falha é de 8,16%).

#### V.3.2.4 Resumo da melhoria da malha de controle da temperatura interna do pasteurizador e recomendações

Na figura a seguir é apresentada a evolução da confiabilidade da malha de controle da temperatura interna do pasteurizador, com o tempo, para a configuração original e a configuração  $TIT'_{1/3}$ - $TSL'_{1/3}$ - $TSH'_{1/3}$ - $RE'_{1/4}$  (com  $\beta_{TIT}$  igual a 2,53% e  $\beta_{TSL}$ ,  $\beta_{TSH}$  e  $\beta_{RE}$  iguais a 10%), esta sendo uma recomendação para o aumento da confiabilidade da malha.

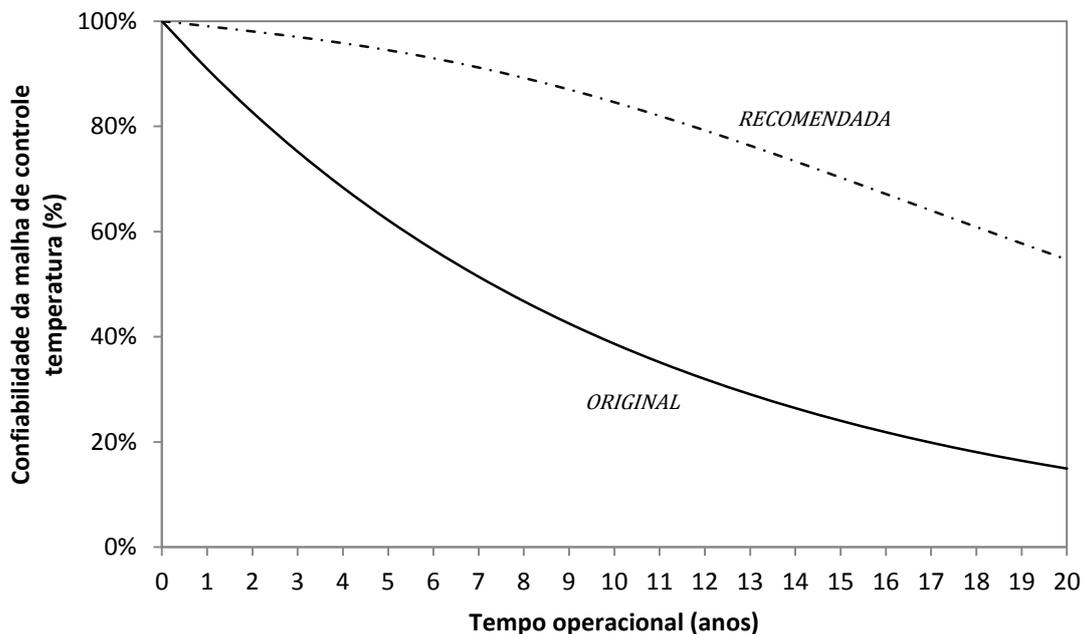


Figura 34 – Confiabilidade da malha de controle da temperatura interna do pasteurizador para a configuração original e a configuração recomendada pelo estudo.

O valor do MTTF para a configuração original é de 10,52 anos e para a configuração recomendada é de 17,56 anos. O aumento do MTTF é de 66,84%, aumento muito expressivo no tempo médio em que a malha apresentaria falha. No entanto, a configuração recomendada da



malha não apresentou um MTTF superior ao tempo de vida útil do PCC. O valor de 2,53% utilizado para o fator  $\beta_{TIT}$  foi atribuído com o intuito de se obter uma confiabilidade da medição da temperatura interna do pasteurizador de no mínimo 99% ao final da vida útil do PCC.

Além disso, diferentemente da malha de controle do nível de água de processo na caldeira, cuja configuração recomendada atendeu ao critério de tolerabilidade de 90% de confiabilidade ao final do tempo de vida útil do PCC, a configuração recomendada para a malha de controle da temperatura interna do pasteurizador apresenta uma confiabilidade de 54,68%. Logo, esta configuração não é capaz de atender ao critério de tolerabilidade.

Atribui-se a este fato o alto valor da taxa de falha dos resistores e a criticidade da caldeira elétrica no processo do PCC-03-02. Conclui-se então que um estudo mais detalhado da confiabilidade deste equipamento, levando em consideração a confiabilidade de seus componentes e elementos internos, deve ser conduzido para que seja possível obter novas soluções, visando o atendimento ao critério de tolerabilidade de 90%.

Outra possibilidade seria a redução dos intervalos de manutenção preventiva e de testes de desempenho, medidas que aumentam significativamente a confiabilidade de um sistema quando corretamente aplicadas.

Na [Figura 35](#) é apresentado o P&ID do subsistema da configuração recomendada para a malha de controle da temperatura interna do pasteurizador.

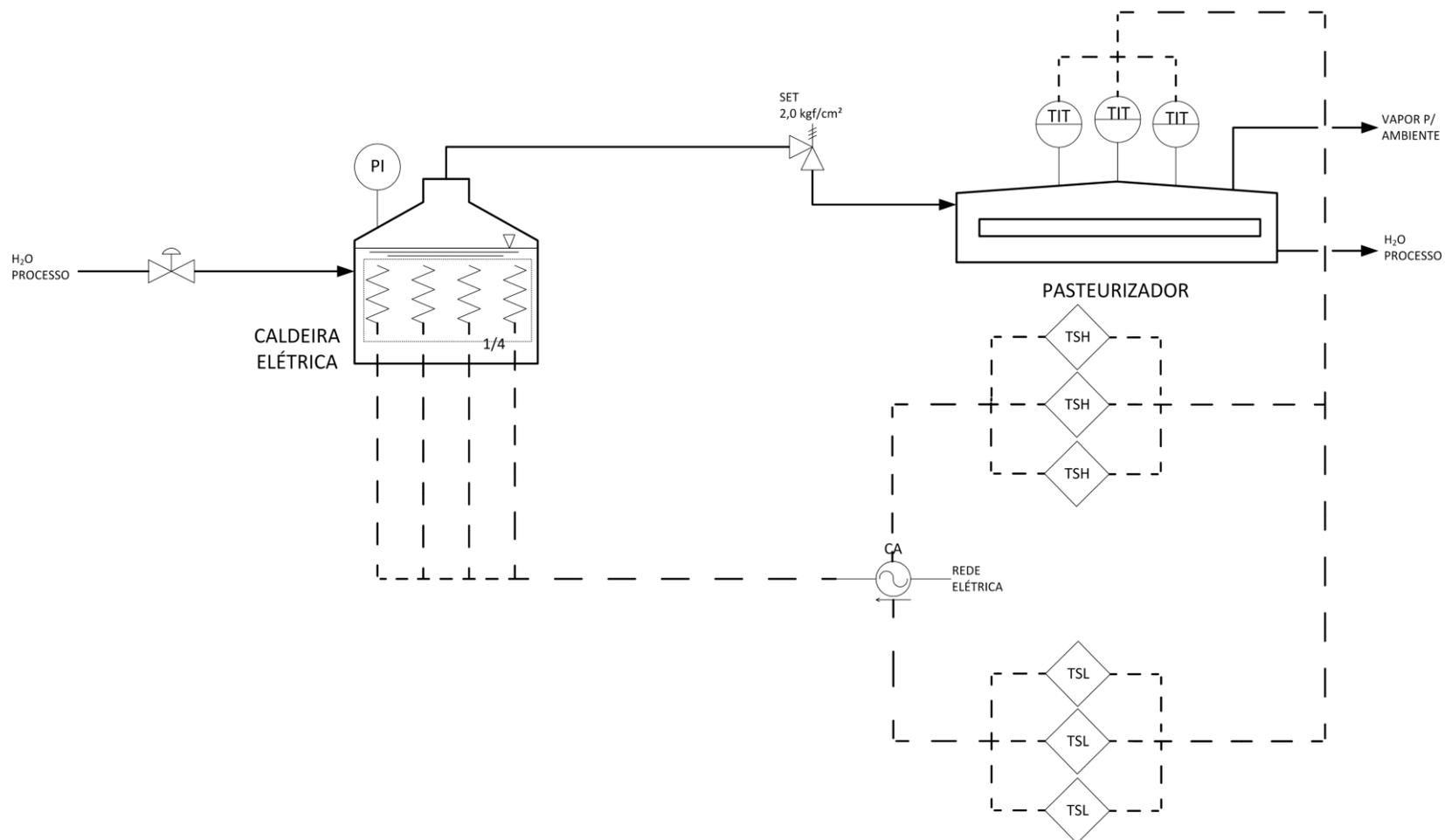


Figura 35 – Fluxograma P&ID da configuração recomendada para a malha de controle da temperatura interna do pasteurizador.



## CAPÍTULO VI. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### VI.1 Melhoria da confiabilidade do PCC-03-02

Foi sugerido no capítulo anterior que a confiabilidade do PCC-03-02 fosse aumentada devido à necessidade da redução do número de possíveis falhas dos equipamentos e da probabilidade de falhas perigosas do PCC (falha na medição de desvios dos limites críticos). Foi possível avaliar separadamente a confiabilidade das duas malhas de controle do PCC (controle do nível de água de processo na caldeira e controle da temperatura interna do pasteurizador). Como recomendações foram elaboradas uma configuração para cada uma destas duas malhas.

Agora, juntando as novas configurações destas malhas, foi obtido como recomendação um novo sistema do PCC-03-02, cuja confiabilidade pode ser expressa matematicamente pela seguinte expressão:

$$R'_{PCC} = [R'_{TIT,a(3)}R'_{LT,a(3)}R'_{TSL,a(3)}R'_{TSH,a(3)}R'_{RE,a(4)}R'_{CE}R'_{VC,a(3)}R'_{VA,a(3)}] \cdot R'$$

Equação 52

Onde:

$$R' = [R'_{TIT}R'_{LT}R'_{TSL}R'_{TSH}R'_{RE}R'_{VC}R'_{VA}]$$

Nesta expressão, foi utilizado o valor de 2,53% para o fator  $\beta_{TIT}$  e para os demais componentes foi utilizado o valor de 10% para os seus respectivos fatores  $\beta$ . Foi assumido que os resistores elétricos estavam configurados em redundância ativa 1/4. Logo, foi necessária a separação da caldeira elétrica em dois “eventos” distintos, vazamento na caldeira elétrica ( $R_{CE}$ ) e “input errado” nos resistores elétricos ( $R_{RE,a(4)}$ ). Com isso, apenas o valor de taxa de falha referente ao modo de falha “vazamento” (Tabela 1) foi utilizado para a função  $R_{CE}$  e, para a função  $R_{RE,a(4)}$ , foi utilizado o valor de taxa de falha referente ao modo de falha “input errado”. A figura a seguir apresenta a evolução da confiabilidade deste novo sistema com o decorrer do tempo operacional, em anos.

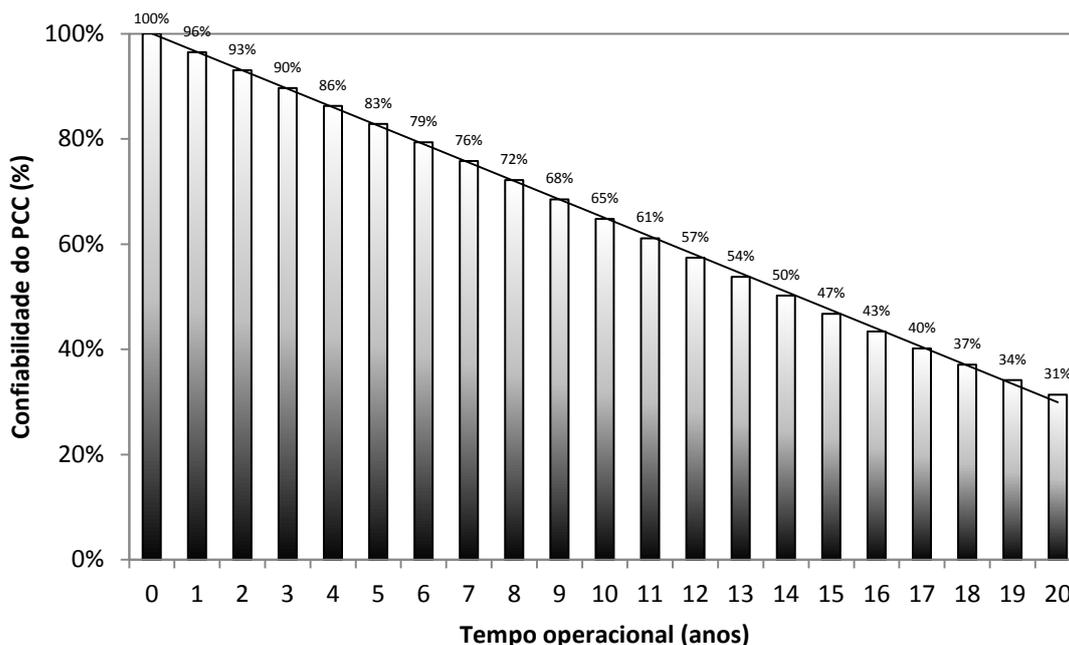


Figura 36 – Confiabilidade da configuração recomendada para o PCC-03-02.

Verifica-se um decaimento aproximadamente linear da confiabilidade desta configuração recomendada com o decorrer do tempo operacional e relativamente rápido, cuja confiabilidade é de 79% após 6 anos de operação. O valor do MTTF para o sistema original é igual a 6,64 anos e para o sistema recomendado é igual a 8,66 anos. O aumento do MTTF é de 30,38%, aumento considerado expressivo para um sistema complexo. A configuração recomendada não apresentou um MTTF superior ao tempo de vida útil do PCC (de 20 anos). Na figura a seguir é apresentado um comparativo entre o comportamento da confiabilidade da configuração original e recomendada, com o tempo operacional em anos:

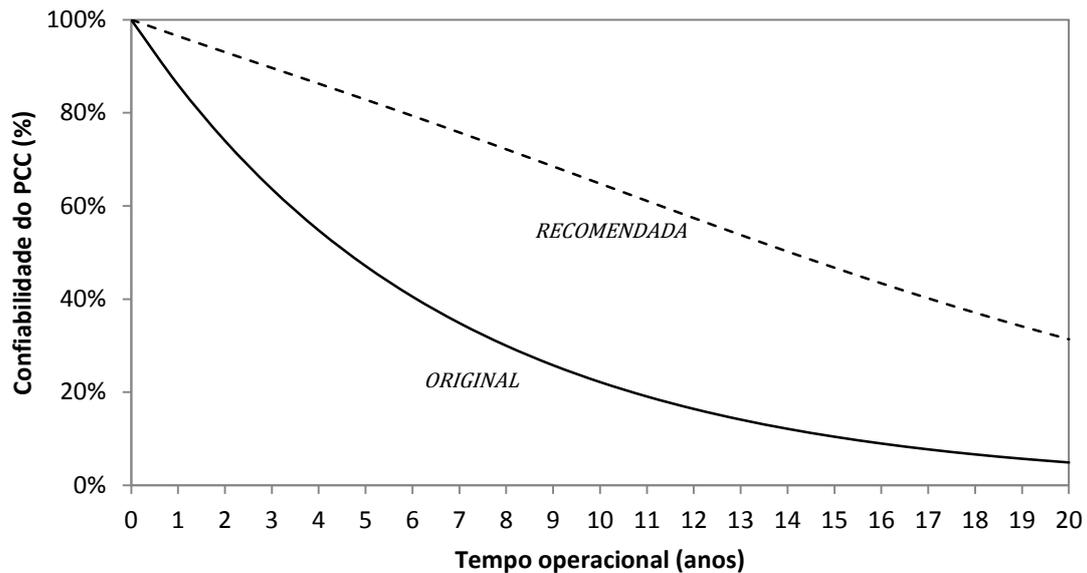


Figura 37 – Comparação entre o comportamento da confiabilidade do PCC para a configuração original e recomendada pelo estudo.

Verifica-se pela figura acima que a configuração original apresenta um decaimento de sua confiabilidade mais acelerado do que a configuração recomendada, ainda mais, pode-se perceber que o decaimento da primeira configuração possui um perfil exponencial enquanto que o decaimento da segunda possui um perfil linear. Isto se dá devido ao efeito que as redundâncias causam no sistema, amortecendo o impacto da utilização de taxas de falha constante na expressão matemática da confiabilidade da configuração original. As taxas de falha dos subsistemas redundantes são nulas para o início da operação e vão crescendo até um valor assintótico, conforme a Figura 7.

De acordo com as informações apresentadas anteriormente, é possível perceber que um estudo de confiabilidade é muito útil na avaliação da eficiência de um PCC, quanto a sua eficácia no controle dos perigos à saúde dos consumidores. Após um estudo de confiabilidade de um PCC, é possível visualizar quais são as limitações e oportunidades de melhoria da etapa do PCC e, o mais importante, verificar a magnitude no aumento da confiabilidade que cada modificação/configuração proposta possui, possibilitando a otimização de quais modificações/configurações devem ser utilizadas.

No entanto, na [Seção V.2.2](#) foi discutido que a caldeira elétrica é um equipamento crítico no processo do PCC-03-02 por ser justamente neste componente que é iniciada a medida de controle do PCC, isto é, a geração de vapor. Porém, foi concluído que os dados de taxa de falha utilizados para a caldeira eram imprecisos.



Isto mostra uma limitação muito importante deste estudo, que foi a utilização de dados não representativos do processo (dados referentes a plataformas de petróleo), acarretando em resultados não condizentes com a realidade em campo das indústrias processadoras de alimentos. Além disso, quanto mais fidedigno às condições de campo for o estudo de confiabilidade, maior será a possibilidade de se obter com mais precisão estimativas para intervalos de manutenção preventiva, intervalos de testes e momentos de substituição dos componentes dos equipamentos.

Conclui-se então que uma análise detalhada, e preferencialmente em campo, dos equipamentos e instrumentos associados a um PCC deve ser conduzida, buscando-se a obtenção de dados fidedignos de taxas de falha.

Entretanto, para que seja possível a obtenção de tais dados, deve-se primeiramente existir no programa de manutenção preventiva e inspeção dos equipamentos e instrumentos algum registro das falhas ocorridas durante toda a vida operacional da planta industrial, o qual também deve conter informações sobre:

- O tipo de falha;
- Tempo inoperante do equipamento;
- Componentes substituídos após o reparo;
- Duração do reparo;
- Períodos de tempo entre falhas;
- Entre outros.

De acordo com o cenário atual das indústrias processadoras de alimentos, as quais em sua grande maioria já possuem processos instalados, a implantação deste monitoramento por registro de falhas mostra-se como uma ferramenta muito útil para a obtenção de dados de confiabilidade dos equipamentos e instrumentos associados a um PCC. É importante que um sistema de gestão da segurança dos alimentos contemple este monitoramento em seus PPR.

Na figura a seguir é apresentado um P&ID da configuração original do PCC-03-02 e, em destaque, os componentes recomendados e as respectivas configurações para adição no processo de pasteurização.

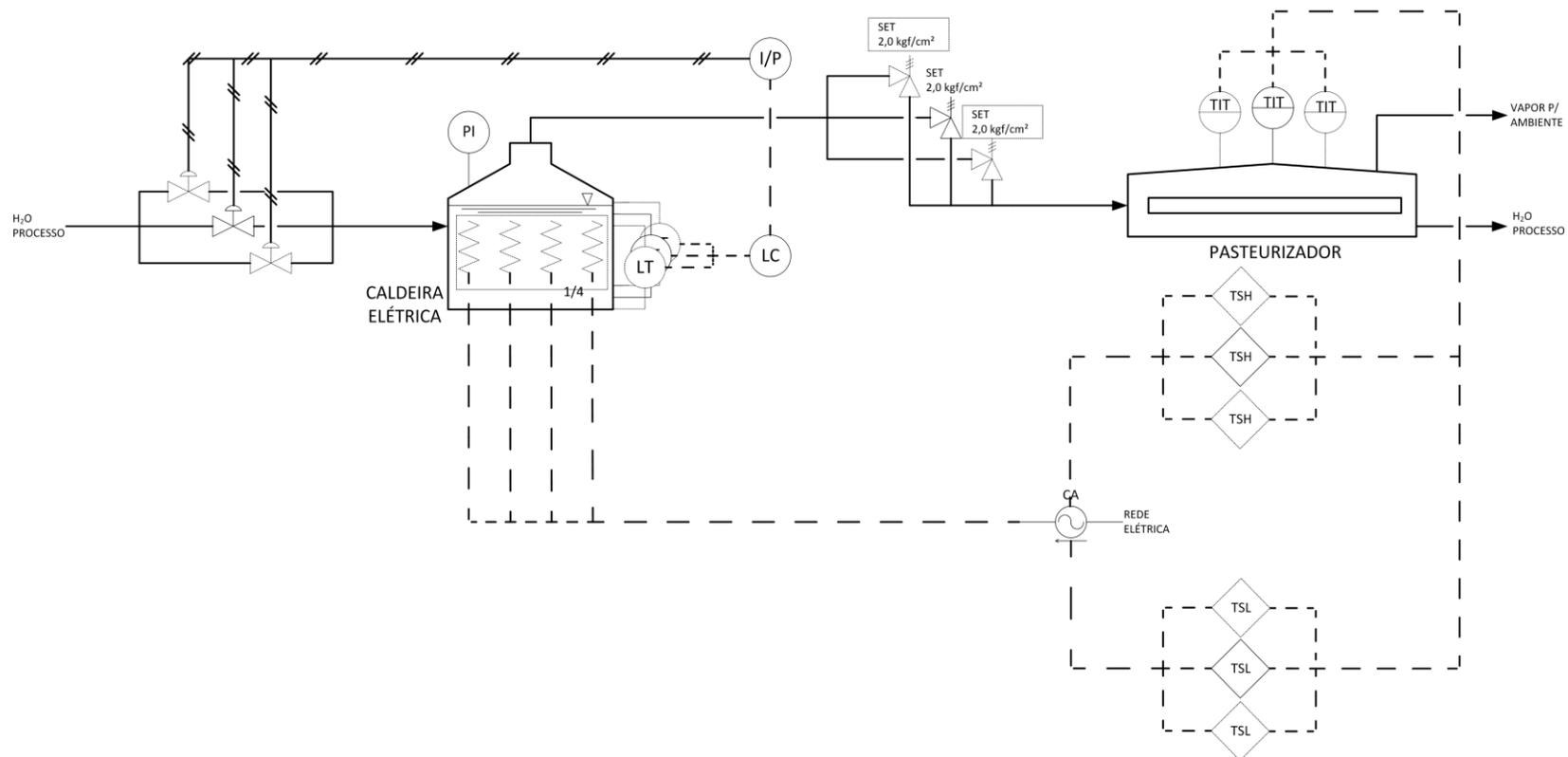


Figura 38 – Fluxograma P&ID do PCC-03-02 da configuração recomendada (componentes “novos” destacados em linhas tracejadas).



## VI.2 Probabilidade de falha perigosa

Na [Seção V.2.2](#) foi discutido que a falha de um PCC pode ser classificada em duas categorias: falha segura (*fail-safe*) e falha perigosa (*fail-danger*). A falha segura é caracterizada pela falha do PCC com sucesso na detecção do desvio do limite crítico, sendo possível a tomada de ações corretivas para retornar o processo às condições de segurança e evitar a venda de produtos possivelmente contaminados. A falha perigosa é caracterizada pela falha do PCC com falha na detecção do desvio do limite crítico, não sendo percebido então que houve um desvio do limite crítico e não se tomando as devidas ações corretivas.

Verificou-se que a medição de parâmetros de processos associados à aplicação das medidas de controle de um PCC é um dos principais eventos em que pode ocorrer falha perigosa, pois esta medição é responsável pelo monitoramento de um possível desvio do limite crítico. Para o PCC-03-02, a medição da temperatura interna do pasteurizador, realizada por um transmissor de temperatura, se mostrou como sendo um destes tipos de eventos.

Na [Seção V.2.2](#) foi apresentada a evolução da confiabilidade do transmissor de temperatura (TIT) com o tempo operacional, em anos. O TIT foi avaliado por ser o componente responsável pela detecção e monitoramento do desvio do limite crítico de no mínimo 85 °C da temperatura interna do pasteurizador. Foi concluído, pelos resultados obtidos ([Figura 22](#)), que, apesar deste componente apresentar uma confiabilidade alta, o mesmo apresenta uma probabilidade falha de 6,09% para um tempo de 6,64 anos (MTTF do PCC-03-02). Foi afirmado que este é um valor relativamente alto para um evento de falha perigosa.

O estudo para melhoria da confiabilidade da medição, apresentado na [Seção V.3.2.1](#), teve como resultado a aplicação de configuração em redundância ativa 1/3 de TITs (logo sendo necessária a utilização de três transmissores) e que a taxa de falha em comum destes componentes, individualmente, deveria ser no máximo igual a 2,53% da taxa de falha total dos mesmos, individualmente. Este resultado foi obtido tendo-se como premissa que a medição deveria apresentar uma confiabilidade mínima de 99% em toda a vida útil do PCC (20 anos).

Foi concluído que, para um estudo de confiabilidade de malhas de instrumentação responsáveis pela medição de um desvio do PCC, uma estratégia conservativa seria a avaliação de sua confiabilidade, considerando que nenhum tipo de manutenção ou testes de desempenho será efetuado em toda a vida útil do processo do PCC. Isto acarretaria em uma segurança maior



da produção do alimento. No entanto, durante a operação do PCC, é recomendada a realização de manutenção e testes de desempenho destas malhas, visando a maior redução possível da probabilidade de falha perigosa (falha na detecção dos desvios de um PCC).

De acordo com as informações acima, um estudo de confiabilidade é útil para que a probabilidade da incidência de falhas perigosas seja minimizada. Isto acarreta na redução do risco existente na produção de alimentos, tanto em aspectos de segurança à saúde dos consumidores quando em aspectos financeiros, conforme apresentado **CAPÍTULO I**.

Por exemplo, supondo que um casal teve que ser internado no hospital por quatro dias, devido ao consumo de produto contaminado, nas condições apropriadas para o consumo. Supondo também que o casal iniciou um processo judiciário contra a empresa alegando que sofreu danos morais, risco de vida, etc., pedindo uma indenização de 20.000 R\$ (vinte mil reais) – quantia condizente com a realidade. Caso a justiça julgue o caso a favor do casal, a empresa teria um prejuízo de 20.000 R\$.

Agora, supondo que o produto consumido pelo casal tenha sido um capelete de carne. Este produto é vendido nos supermercados, em média, por 5,00 R\$ (cinco reais). Supondo também que os supermercados, em média, agregam 25% do preço de compra ao preço de venda, logo sendo a quantia recebida pela empresa por embalagem de 4,00 R\$ (quatro reais). O prejuízo seria então equivalente a uma perda da produção de 5.000 embalagens. Sabendo que o processo de produção de capelete possui uma capacidade de 100 kg/h e que cada embalagem contém 400 g de produto, o prejuízo seria equivalente a uma perda de 20 horas de produção (ou equivalente a uma perda de 2,5 dias de produção).

Para o processo de pasteurização do PCC-03-02, um estudo financeiro balanceando os custos da instalação, operação e manutenção de três transmissores de temperatura em redundância ativa 1/3 (configuração recomendada para a medição da temperatura interna do pasteurizador) e o prejuízo oriundo da venda do produto contaminado com certeza iria mostrar que a primeira opção é menos custosa.

Agora, para um caso mais grave dado por um surto de contaminação em um grupo de pessoas, como em um restaurante, refeitório, etc., podendo ser a quantidade de pessoas neste grupo de 50, 100, 200, ou até mais, o prejuízo seria muito maior, onde este tipo de caso pode levar até a interdição da planta industrial. Além disso, há o prejuízo referente a “efeitos colaterais” como a degradação da imagem da marca, custo associado ao *recall* dos lotes



possivelmente contaminados, custo associado à identificação das fontes da contaminação como resposta aos órgãos reguladores, entre outros.

Conclui-se então que, além dos benefícios da produção de um alimento mais seguro, um estudo de confiabilidade dos PCCs acarreta em uma redução do risco financeiro dos processos de produção dos alimentos, já que perigos potenciais à saúde dos consumidores infelizmente são inerentes a estes processos.

### **VI.3 Manutenção preventiva e testes de desempenho**

Em toda a extensão do texto deste trabalho, foi discutida a importância da manutenção preventiva e da realização de testes de desempenho nos equipamentos e instrumentos associados aos PCCs.

A manutenção preventiva está diretamente relacionada com o aumento da confiabilidade de um sistema devido sua capacidade de restaurar os equipamentos e instrumentos a condições como se os mesmos fossem novos ou recentes. A realização de manutenção preventiva dos equipamentos e instrumentos associados a um PCC é uma exigência da Norma ISO 22.000 e das BPF, o que determina que um sistema de gestão de segurança dos alimentos possua como PPR um programa de manutenção preventiva.

A principal melhoria da confiabilidade pela manutenção preventiva reside na redução da probabilidade de falha de equipamentos e instrumentos associados a eventos de falha segura de um PCC. Uma menor probabilidade de falha acarreta em uma redução do número de possíveis falhas do PCC, além de que um programa de manutenção preventiva com registros, monitoramento e melhoria contínua torna possível a identificação das causas destas falhas, o que torna mais eficiente o sistema de gestão.

Os testes de desempenho são muito importantes para aumentar a confiabilidade de equipamentos e instrumentos associados a eventos de falha perigosa de um PCC. Como explicado neste trabalho, uma falha perigosa de um PCC não é detectada durante a produção do alimento, portanto não sendo paralisado o processo. Sendo assim, estas falhas podem ser detectadas somente durante a calibração, manutenção e testes fora do período de produção.



É muito importante então que os intervalos de tais testes sejam especificados com base em um estudo de confiabilidade. A realização destes testes em intervalos de tempo apropriados faz com que os instrumentos estejam altamente disponíveis para desempenhar a devida função quando demandada, dada pela medição de um desvio do limite crítico.

Conclui-se então que um programa de manutenção preventiva e inspeção dos equipamentos e instrumentos auxiliam bastante a eficiência e operação segura dos PCCs. Com isso, mesmo que os equipamentos ou uma malha de instrumentação e controle, associados a um PCC, sejam configurados e projetados para apresentar uma confiabilidade alta, deve-se aplicar a manutenção e inspeção dos mesmos, como algo conservativo para obter maior eficiência e segurança do PCC.

## **VI.4 Possíveis estudos dos demais PCCs**

Na [Seção IV.4](#) foram apresentadas três etapas dos processos de produção da planta industrial da Nápoles que poderiam ser classificadas como PCCs. No entanto, somente foi realizado o estudo de confiabilidade para uma delas (Processo 03 – Ravióli, Capelete, Pastel Recheado, Fagotini e Nhoque, Etapa 06 – Pasteurização), numerada como o PCC-03-02.

No estudo de confiabilidade elaborado neste trabalho para este PCC foi possível detalhar muito bem o processo aplicado na etapa do PCC, considerando como é iniciada e finalizada a medida de controle, quais parâmetros do processo estavam associados ao monitoramento da eficácia da medida de controle, como são integrados os equipamentos e instrumentos, entre outros fatores. Com isso, foi possível identificar as limitações, dificuldades e recomendações plausíveis oriundas do estudo de confiabilidade específico para o processo deste PCC (Pasteurização por contato direto com vapor d' água).

Agora, para as demais etapas dos outros PCCs, o detalhamento, assim como as limitações, dificuldades e recomendações plausíveis, seriam totalmente diferentes. Por exemplo, os dados de taxa de falha dos equipamentos e instrumentos destes PCCs poderiam ser imprecisos ou não estarem disponíveis, acarretando na dificuldade da condução do estudo ou até não sendo possível realizá-lo. As características do processo também poderiam ser diferentes, como é o caso da Detecção de Metais, etapa que só opera quando demandada. Logo, sua análise de confiabilidade deveria utilizar os conceitos de probabilidade de falha na demanda.



Verifica-se então que um estudo de confiabilidade de um PCC pode ser conduzido de diversas formas e tendo-se variadas considerações e premissas, dependendo de como é a operação, o processo e as características do PCC.

Este trabalho teve como objetivo apresentar a técnica e os conceitos de confiabilidade como uma ferramenta para ser utilizada em um sistema de gestão de segurança dos alimentos, principalmente no gerenciamento de manutenção de equipamentos e instrumentos associados aos PCCs e suas respectivas falhas. No entanto, devido a grande diversidade de metodologias e possíveis maneiras de conduzir um estudo de confiabilidade, não há como apresentar em um único trabalho todas estas possíveis maneiras.

Este trabalho pode ser utilizado como uma referência para que futuros trabalhos, tanto em pesquisa quanto em campo, sejam capazes de abordar com clareza e detalhamento novos estudos de confiabilidade de PCCs. A realização de estudos mais detalhados sobre o efeito da manutenção preventiva e intervalos de testes na confiabilidade dos PCCs e também uma avaliação econômica do ganho obtido pela implantação de configurações de maior confiabilidade agregariam mais conhecimentos à engenharia de alimentos, possibilitando a aplicação de estratégias e técnicas de engenharia para a produção de alimentos mais seguros acoplada a minimização dos respectivos custos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FELLOWS, P. J. *Tecnologia do processamento de alimentos*. 2º ed. Porto Alegre: ARTMED, 602 p., 2006.
- [2] BERTOLINO, M. T. *Gerenciamento da Qualidade na Indústria Alimentícia*. 1º ed. Porto Alegre: ARTMED, 320 p., 2010.
- [3] SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI). *Guia para elaboração do plano APPCC: geral*. 2ª ed. Brasília, 2000. 301 p. (Série Qualidade e Segurança Alimentar). Projeto APPCC Indústria. Convênio CNI/SENAI/SEBRAE.
- [4] BRASIL. Portaria n. 1428, de 26 de novembro de 1993. Regulamento técnico para inspeção sanitária de alimento; diretrizes para o estabelecimento de Boas Práticas de Produção e de Prestação de Serviços na Área de Alimentos; e regulamento técnico para o estabelecimento de padrão de identidade e qualidade para serviços e produtos na área de alimento. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2 de dez. de 1993. Seção 1, p. 18415-18419.
- [5] ABNT NBR ISO 22.000:2006. *Sistemas de gestão da segurança de alimentos – Requisitos para qualquer organização na cadeia produtiva de alimentos*. 1ª edição, 2006.
- [6] CODEX ALIMENTARIUS. Food Hygiene. Basic texts. Fourth edition - 2009. Codex Alimentarius Commission - Joint FAO/WHO Food Standards Programme. 132p. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/012/a1552e/a1552e00.htm>. Acesso em: 30 de novembro de 2011.
- [7] LEWIS, E. E. *Introduction to Reliability Engineering*. 2ª ed. Nova Iorque: JOHN WILEY & SONS, 435 p., 1994.
- [8] BRASIL. Resolução RDC n. 216, de 15 de setembro de 2004. Dispõe sobre regulamento técnico de boas práticas para serviços de alimentação. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 16 de set. de 2004. Disponível em: [http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/aa0bc300474575dd83f2d73fbc4c6735/RDC\\_N\\_216\\_DE\\_15\\_DE\\_SETEMBRO\\_DE\\_2004.pdf?MOD=AJPERES](http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/aa0bc300474575dd83f2d73fbc4c6735/RDC_N_216_DE_15_DE_SETEMBRO_DE_2004.pdf?MOD=AJPERES). Acesso em: 30 de novembro de 2011.



- [9] BRASIL. Resolução RDC nº 27 de 6 de agosto de 2010. Dispõe sobre as categorias de alimentos e embalagens isentos e com obrigatoriedade de registro sanitário. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 9 ago. 2010. Disponível em: [http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/2002/275\\_02rdc.htm](http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/2002/275_02rdc.htm). Acesso em: 30 de novembro de 2011.
- [10] BRASIL. Resolução RDC nº 275, de 21 de outubro de 2002. Dispõe sobre o regulamento técnico de Procedimentos Operacionais Padronizados aplicados aos estabelecimentos produtores/industrializadores de alimentos e a lista de verificação das Boas Práticas de Fabricação em estabelecimentos produtores/industrializadores de alimentos. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 6 nov. 2002. Disponível em: [http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/2002/275\\_02rdc.htm](http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/2002/275_02rdc.htm). Acesso em: 30 de novembro de 2011.
- [11] RAHMAN, M. S. *Handbook of Food Preservation*. 2ª ed. NW: CRC PRESS, 1068 p., 2007.
- [12] Embrapa Agrobiologia, Documento nº 222, ISSN 1517-8498 – “Perigos Físicos nos Alimentos”. Dez/2006.
- [13] Embrapa Agrobiologia, Documento nº 224, ISSN 1517-8498 – “Perigos Químicos nos Alimentos”. Dez/2006.
- [14] JAY, James M. *Microbiologia de Alimentos*. 6ª ed. Porto Alegre: ARTMED, 711 p., 2005.
- [15] BRASIL. Resolução RDC nº 12, de 2 de janeiro de 2001. Aprova o Regulamento Técnico sobre padrões microbiológicos para alimentos. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 10 jan. 2001. Disponível em: [http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/a47bab8047458b909541d53fbc4c6735/RDC\\_12\\_2001.pdf?MOD=AJPERES&useDefaultText=0&useDefaultDesc=0](http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/a47bab8047458b909541d53fbc4c6735/RDC_12_2001.pdf?MOD=AJPERES&useDefaultText=0&useDefaultDesc=0). Acesso em: 30 de novembro de 2011.
- [16] SINTEF Industrial Management, Safety and Reliability, OREDA Project Manager. *OREDA: Offshore Reliability Data*. 4ª ed. Høvik (Noruega): Det Norske Veritas, 835 p., 2002.
- [17] SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. *Introduction to Food Engineering*. 4ª ed. EUA: ACADEMIC PRESS, 841 p., 2009.