

**MÁRCIO CÉSAR CARZINO**

**PROJETO E ANÁLISE PARA DIMENSIONAMENTO AUTOMÁTICO  
DE FORNOS PARA COZIMENTO DE PÃES E BISCOITOS.**

**CURITIBA**

**2006**

**MÁRCIO CÉSAR CARZINO**

**PROJETO E ANÁLISE PARA DIMENSIONAMENTO AUTOMÁTICO  
DE FORNOS PARA COZIMENTO DE PÃES E BISCOITOS.**

**Dissertação apresentada como requisito  
parcial à obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica do curso de  
Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal do Paraná, UFPR.**

**Orientador: Prof. Dr. Dmitri Vlassov**

**CURITIBA**

**2006**

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**MÁRCIO CÉSAR CARZINO**

**PROJETO E ANÁLISE PARA DIMENSIONAMENTO AUTOMÁTICO DE FORNOS PARA  
COZIMENTO DE PÃES E BISCOITOS**

Orientador: Prof. Dr. Dmitri Vlassov  
Setor de Tecnologia, UFPR

Curitiba, Junho de 2006

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE GRÁFICOS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS .....</b>	<b>X</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XV</b>
<b>1.INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 HISTÓRICO DO CONSUMO DE PÃES E BISCOITOS .....	1
1.2 A HISTÓRIA DO PÃO:.....	3
1.2.1 O pão na Idade Média.....	4
1.2.2 O pão no Brasil.....	5
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....</b>	<b>7</b>
2.1 A IMPORTÂNCIA DA RECIRCULAÇÃO INTERNA FORÇADA .....	8
<b>3 DADOS TÉCNICOS SOBRE PÃES E BISCOITOS .....</b>	<b>11</b>
3.1 INGREDIENTES E SUAS FUNÇÕES .....	11
3.1.1 Farinha de trigo.....	11
3.1.2 Fermentos .....	13
3.1.3 Água .....	16
3.1.4 Leite.....	17
3.1.5 Gordura.....	18

3.1.6 Açúcar.....	18
3.1.7 Enzimas e melhoradores.....	19
3.1.8 Sais minerais.....	19
3.2 O PROCESSO DE COZIMENTO .....	20
3.3 VAPORIZAÇÃO .....	24
<b>4 FORNOS E SUAS CARACTERÍSTICAS.....</b>	<b>26</b>
4.1 TIPOS DE FORNOS .....	26
4.1.1 Fornos Tipo Peel.....	26
4.1.2 Forno tipo Gaveta e Placa Rotativa .....	27
4.1.3 Forno tipo Carrossel .....	29
4.1.4 Tipo Volta Simples.....	30
4.1.5 Tipo Volta Dupla.....	31
4.1.6 Tipo Túnel .....	31
4.1.7 Fornos para biscoitos.....	32
4.2 A TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA EM FORNOS .....	33
<b>5 FONTES DE ENERGIA USADAS EM FORNOS .....</b>	<b>39</b>
<b>6 ANÁLISE TÉRMICA DO FORNO .....</b>	<b>45</b>
6.1 BALANÇO TÉRMICO.....	45
<b>7 ANÁLISE TÉRMICA DE UM FORNO INSTALADO .....</b>	<b>54</b>
7.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO FORNO.....	54
7.2 CÁLCULO DO BALANÇO TÉRMICO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	62
<b>8 PROJETO AUTOMÁTICO PARA FORNOS .....</b>	<b>67</b>
8.1 FLUXOGRAMA DO PROJETO .....	67
8.2 PROJETO AUTOMÁTICO DO FORNO DE CONVECÇÃO .....	70

<b>9 CONCLUSÃO E COMPARAÇÃO COM DADOS REAIS.....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>81</b>
ANEXO 1 – SUPRIMENTO DE TRIGO .....	81
ANEXO 2 – PROGRAMA COMPUTACIONAL E VALORES .....	82
ANEXO 3 – TABELA DE EQUIPAMENTOS .....	93
ANEXO 4 – A HAAS DO BRASIL .....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade de produção de trigo por dia .....	1
Tabela 2 – Consumo per capita de trigo no mundo:.....	2
Tabela 3 – Consumo per capita de pães no mundo em kg:.....	2
Tabela 4 – Consumo per capita de biscoitos no mundo em kg:.....	3
Tabela 5 – A composição das farinhas de trigo .....	12
Tabela 6 – Tipos de reações no cozimento .....	20
Tabela 7 – Valores ótimos de coeficiente de excesso do ar na fornalha para vários combustíveis .....	43
Tabela 8 – Porcentagem volumétrica de produtos de combustão de combustíveis .....	44
Tabela 9 – Dados de transferência de calor por convecção: .....	49
Tabela 10 – Dados de transferência de calor por radiação: .....	51
Tabela 11 – Dados da água de vaporização: .....	52
Tabela 12 – Valores do balanço térmico.....	62
Tabela 13 – Dados de isolamento:.....	73

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Reações que ocorrem na massa durante o processo de cozimento.....	23
Gráfico 2 – Oferta de energia interna em 2002 no Brasil.....	40
Gráfico 3 – Oferta de energia no mundo em 2002.....	41
Gráfico 4 – Calores que entram no forno.....	65
Gráfico 5 – Calores que saem do forno .....	66



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balanço térmico - calores que entram e saem do forno.....	7
Figura 2 – Simulação da transferência de calor no forno .....	10
Figura 3 – Representação esquemática do metabolismo dos carboidratos e fermentação .....	14
Figura 4 – Forno tipo peel.....	27
Figura 5 – Forno tipo gaveta .....	28
Figura 6 – Forno tipo placa rotativa .....	28
Figura 7 – Forno tipo carrossel.....	29
Figura 8 – Forno tipo volta simples.....	30
Figura 9 – Forno tipo volta dupla .....	31
Figura 10 – Forno tipo túnel.....	32
Figura 11 – Sistema de aquecimento com radiação indireta.....	35
Figura 12 – Sistema de aquecimento por convecção natural direta com combustores lineares. ....	36
Figura 13 – Forno aquecido por radiação indireta e convecção forçada.....	37
Figura 14 – Sistema de aquecimento com convecção forçada direta.....	37
Figura 15 – Vista lateral do sistema de aquecimento com tubos radiantes .....	38
Figura 16 – Foto do forno de convecção .....	55
Figura 17 – Foto forno de convecção – Camara de cozimento.....	56
Figura 18 – Foto forno de convecção – Traseira do forno.....	57
Figura 19 – Esquema de funcionamento do forno de convecção.....	58
Figura 20 – Foto forno de convecção – Combustor .....	60
Figura 21 – Foto forno de convecção – Porta com vidro duplo.....	61
Figura 22 – Desenho do forno Haas .....	73
Figura 23 – Distância entre tubos trocadores de calor.....	74

Figura 24 – Distância entre vidros.....	75
Figura 25 – Planta da Haas do Brasil em Curitiba .....	96
Figura 26 – Foto da fábrica da Haas do Brasil-máquina de corte laser.....	97
Figura 28 – Foto da fábrica da Haas do Brasil-montagem de máquinas.....	99
Figura 29 – Foto da fábrica da Haas do Brasil-montagem de fornos.....	100

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

Símbolo	Denominação	unidade
Alfabeto Latino		
<i>A</i>	Área superficial do pão	m <sup>2</sup>
<i>B</i>	Consumo de combustível gasoso	m <sup>3</sup> /s
<i>C</i>	Calor latente	kJ/kg
<i>c</i>	Calor específico	kJ/kg K
<i>c<sub>p</sub></i>	Calor específico à pressão constante	kJ/kg K
<i>c<sub>pv</sub></i>	Calor específico à pressão constante volumétrico	kJ/m <sup>3</sup> K
<i>D</i>	Diâmetro médio	m
<i>e</i>	Espessura do isolamento	m
<i>E</i>	Entalpia	kJ/kg
<i>F</i>	Fator de visibilidade	
<i>g</i>	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
<i>H</i>	Altura do forno	m
<i>h</i>	Coefficiente de transferência de calor	W/m <sup>2</sup> K
<i>k</i>	Condutividade térmica	W/m K
<i>L</i>	Comprimento do forno	m
<i>m</i>	Massa	kg
<i>ṁ</i>	Vazão	m <sup>3</sup> /s
<i>n</i>	Número ou quantidade	
<i>N</i>	Potência	kW
<i>Nu</i>	Número de Nusselt	
<i>p</i>	Pressão	Pa

$PCI$	Poder calorífico inferior	$\text{kJ/Nm}^3$
$Pr$	Número de Prandtl	
$q$	Calor físico unitário	$\text{kJ/m}^3$
$Q$	Calor	$\text{kJ}$
$r$	Parte volumétrica	
$R$	Constante geral dos Gases	$8,314 \text{ J/mol K}$
$Ra$	Número de Rayleigh	
$S$	Distância	$\text{m}$
$T$	Temperatura	$\text{K}$
$V$	Volume	$\text{m}^3$
$U$	Velocidade	$\text{m/s}$
$W$	Largura do forno	$\text{m}$
Alfabeto Grego		
$\alpha$	Difusidade térmica	$\text{m}^2/\text{s}$
$\beta$	Coefficiente de expansão térmica	$1/\text{K}$
$\gamma$	Excesso do ar na mistura combustível	
$\varepsilon$	Emissividade	
$\eta$	Rendimento	
$\kappa$	Constante	
$\nu$	Viscosidade cinemática	$\text{m}^2/\text{s}$
$\pi$	Número constante Pi	$3,14$
$\sigma$	Constata de Stefan-Boltzmann	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
$\tau$	Intervalo de tempo	$\text{s}$
$\psi$	Constante de distância	
Índices		
$i$	Início do cozimento	

<i>e</i>	Final do cozimento
<i>j</i>	j-jésimo componente
Subscritos	
$\infty$	Ambiente
1	Material a ser produzido
2	Gases de escape
5	Perdas para o ambiente através de paredes
<i>ac</i>	Ar para combustão
<i>Al</i>	Alumínio
<i>Alc</i>	Álcool
<i>am</i>	Amido de milho
<i>ar</i>	Ar
<i>at</i>	Amido de trigo
<i>atm</i>	Atmosfera
<i>b</i>	Pão
<i>bal</i>	Face inferior do forno, o lastro
<i>bot</i>	Face atrás do forno, o fundo
<i>ch</i>	Câmara de cozimento
<i>cv</i>	Revestimento externo
<i>con</i>	Convecção
<i>doo</i>	Porta do forno
<i>e</i>	Final do cozimento
<i>eb</i>	Ebulição
<i>end</i>	Reações endotérmicas
<i>eq</i>	Equivalente
<i>exo</i>	Reações exotérmicas

<i>f</i>	Combustível
<i>fer</i>	Fermentação
<i>fv</i>	Fibra de vidro
<i>g</i>	Gases
<i>gel</i>	Gelatinização
<i>gl</i>	Vidro
<i>i</i>	Início do cozimento
<i>ins</i>	Isolamento
<i>lat</i>	Face lateral do forno
<i>opt</i>	Ótimo ou otimizado
<i>pt</i>	Perdas por transmissão
<i>Q</i>	Combustor
<i>rad</i>	Radiação
<i>re</i>	Reserva
<i>roo</i>	Face superior do forno (o teto)
<i>s</i>	Superfície do pão
<i>sp</i>	Suplementar fornecido ao forno
<i>st</i>	Vapor de água
<i>ss</i>	Aço inoxidável
<i>su</i>	Açúcar
<i>t</i>	Bandeja
<i>tot</i>	Total
<i>tu</i>	Tubo trocador de calor
<i>v</i>	ventilador
<i>w</i>	Água

## RESUMO

Existem vários modelos e tipos de fornos para o cozimento de pães e biscoitos com princípios de cozimento e combustíveis diferentes. Para o dimensionamento destes fornos foi elaborado um programa no software Fortran capaz de calcular o balanço térmico do processo de cozimento, isto é todos os calores que entram e saem do forno. E capaz de encontrar as medidas ótimas de projeto, determinar as dimensões do forno e dados como o consumo de combustível e potência dos combustores. Para isso foi determinado o coeficiente de transferência de calor ao pão em fornos onde o princípio de cozimento é a convecção forçada aliada a radiação. Foi testado o forno protótipo na empresa Haas e foram medidas as temperaturas do forno durante o cozimento e a partir destes dados foi calculado o coeficiente de transferência de calor ao pão achando o valor de aproximadamente  $23 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , valor este compatível com a literatura. Este valor foi significativo para a resolução do balanço e a elaboração do programa. Este programa será muito útil, pois através dele pode-se dimensionar fornos que ajudem a desenvolver projetos para a indústria de panificação, visando maior facilidade de montagem, uma grande produtividade com o máximo rendimento possível e o mínimo de emissões de gases e poluentes na natureza.

*Palavras Chave: Balanço Térmico, Coeficiente de transferência de calor, Fornos.*

## ABSTRACT

There are some models and types of ovens for baking breads and biscuits with baking principles and fuels different. For the sizing of these ovens a program in software Fortran was elaborated capable to calculate the thermal balance of the baking process, that is, all the heats that enter and leave the oven. And capable to determine the excellent measures of project, to determine the dimensions of the oven and data as fuel consumption and power of the burners. For this, was determined the heat transfer coefficient to bread in ovens where the baking principle is the forced convection allied the radiation. The prototype oven was tested in Haas company and had been measured the oven temperatures during the baking and to leave from these data was calculated the heat transfer coefficient to bread having found value of approximately  $23 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . This value was significant for determination of the thermal balance and the elaboration of the program. This program will be very useful therefore through it can be sizing ovens that help to develop projects for the bakery industry, aiming at bigger easiness to assembly, a great productivity with the maximum possible income and the minimum of emissions of gases and pollutants in the nature.

*Keywords: Thermal balance, Heat transfer coefficient, ovens.*



## 1.INTRODUÇÃO

### 1.1 HISTÓRICO DO CONSUMO DE PÃES E BISCOITOS

No Brasil são consumidas aproximadamente 12 milhões de toneladas de trigo ao ano, sendo que 10 milhões dessas são destinadas à produção de farinha usadas na fabricação de pães, massas, bolos e biscoitos<sup>1</sup>. É de interesse da indústria de equipamentos e de processamento destes produtos a otimização da fabricação e dos processos envolvidos no preparo de pães e biscoitos. Dados da tabela 1 mostram que o consumo de trigo e derivados tem aumentado mesmo em tempos de recessão. A capacidade de moagem de trigo na década de noventa quase duplicou, cresceu cerca de setenta por cento, sendo que o crescimento populacional não foi tão significativo assim. Isto demonstra que o setor de produção de alimentos derivados do trigo tem grande potencial de crescimento.

TABELA 1 – CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE TRIGO POR DIA

Região	kg/dia	
	Em 31/01/1990	Em 31/01/2000
Norte	844.320	1.250.000
Nordeste	5.322.410	9.189.000
Sudeste	15.758.689	21.872.524
Centro-Oeste	704.659	2.655.000
Sul	7.389.290	16.268.382
Total	30.019.368	51.234.906

FONTE: REVISTA PROPAN

Como é possível observar na tabela 2 o consumo de trigo no Brasil ainda é muito baixo em comparação com outros países do mundo, e também abaixo da média mundial. Isto projeta um crescimento mínimo neste setor de aproximadamente vinte

---

<sup>1</sup> FONTE: IBGE,2005

por cento.

TABELA 2 – CONSUMO PER CAPITA DE TRIGO NO MUNDO:

<b>País</b>	<b>Quantidade per capita (kg/ano)</b>
Itália	151,8
Argentina	128,6
Média Mundial	67,0
Brasil	53,9

FONTE: ONU, 2003

Quando é analisado apenas o consumo de pães, é possível visualizar um crescimento ainda maior. A tabela 3 mostra que a meta da OMS (Organização Mundial da Saúde) órgão da ONU é de 60kg por ano sendo o consumo de pães por ano do brasileiro de apenas 27 kg.

TABELA 3 – CONSUMO PER CAPITA DE PÃES NO MUNDO EM KG:

<b>País</b>	<b>Quantidade per capita (kg/ano)</b>
Chile	93
Argentina	73
Itália	60
Meta da OMS	60
França	56
Brasil	27

FONTE: REVISTA SAFRAS E MERCADO 1999

O consumo de biscoitos não é tão significativo comparado com os pães, mas representa cerca de onze por cento do segmento de mercado de farinhas. Já o uso de farinhas na panificação representa cinquenta e cinco por cento. A tabela 4 mostra que o consumo de biscoitos per capita no Brasil é de 5,9kg por ano, sendo que a Holanda país que mais consume biscoitos per capita por ano é de 14kg.

TABELA 4 – CONSUMO PER CAPITA DE BISCOITOS NO MUNDO EM KG:

<b>País</b>	<b>Quantidade per capita (kg/ano)</b>
Holanda	14,1
Irlanda	11,2
Suécia	10,1
Argentina	7,9
Espanha	6,8
Brasil	5,9

FONTE: REVISTA SAFRAS E MERCADO 1999

## 1.2 A HISTÓRIA DO PÃO:

O pão é um alimento que resulta do cozimento de uma massa feita com farinha de certos cereais, principalmente trigo, água e sal.

Seu uso na alimentação humana é antiqüíssimo. Pelas informações que se têm, a história mais remota do pão se origina em milhares de anos a.C. O trigo era triturado o com grandes peças de carvalho, sendo depois lavado com água fervente para tirar o amargor. Em seguida, a farinha secava ao sol, e se faziam broas com farinha.

Antes de servirem para fazer pão, as farinhas, de diversos cereais, eram usadas em sopas e mingaus. Posteriormente se passou a misturar nas farinhas mel, azeite doce, mosto de uva, tâmaras esmagadas, ovos e carne moída, formando-se espécie de bolos, que teriam precedido o pão propriamente dito. Esses bolos eram cozidos sobre pedras quentes ou sob cinzas.

Os primeiros pães também foram assados sobre pedras quentes ou debaixo de cinzas, datando, ao que consta, do VII milênio a.C. a utilização de fornos de barro para cozimento de pães. Foram os egípcios os primeiros que usaram os fornos, sendo atribuída a eles também a descoberta do acréscimo de líquido fermentado à massa do pão para torná-la leve e macia.

No Egito, o pão era o alimento básico. Segundo Heródoto<sup>2</sup>, era amassado com os pés, e normalmente feito de cevada, espécies de trigo de qualidade inferior. Os pães preparados com trigo de qualidade superior eram destinados apenas aos ricos. Com o pão no Egito também se pagavam salários: um dia de trabalho valia três pães e dois cântaros de cerveja. Os judeus também fabricavam seus pães na mesma época, porém não utilizavam fermentos por acreditarem que a fermentação era uma forma de putrefação e impureza. A Jeová só ofereciam pão ázimo, sem fermento, o único que consomem até hoje na Páscoa.

Na Europa o pão chegou através dos gregos. O pão romano era feito em casa, pelas mulheres, tendo passado posteriormente a ser fabricado em padarias públicas, surgindo, então, os primeiros padeiros. Isto teria acontecido, segundo o filósofo romano Plínio, depois da conquista da Macedônia, em 168 a.C. Na Antiguidade, os deuses (e os mortos) egípcios, gregos e romanos eram honrados com oferendas de animais, flores em massa de pão. Era comum ainda, entre egípcios e romanos a distribuição de pães aos soldados, como complemento do soldo, tendo perdurado este costume na Idade Média.

### 1.2.1 O pão na Idade Média

Com a queda do Império Romano e da organização por ele imposta ao mundo, as padarias européias desapareceram, retornando o fabrico doméstico do pão na maior parte da Europa. O senhor feudal permitia apenas o uso do moinho e dos fornos. Voltou a se consumir, pela comodidade no fabrico, o pão ázimo, sem fermento e achatado, que acompanhava outros alimentos, como a carne e sopas.

Nessa época, somente os castelos e conventos possuíam padarias. Os

---

<sup>2</sup> Heródoto, grego de Halicarnasso, foi historiador antigo, que viveu de 484 a.C. à 420 a.C.

métodos de fabrico de pães eram incipientes e, apesar das limitações na produção, as corporações de padeiros já tinham alguma força. No século XVII, a França se tornou o centro de fabricação de pães de luxo, com a introdução dos modernos processos de panificação, apesar de desde o século XII já ser habitual o consumo de mais de vinte variedades de pães naquele país. Depois, a primazia no fabrico de pão passou a Viena, Áustria.

A invenção de novos processos de moagem da farinha contribuiu muito para a indústria de panificação. Os grãos de trigo, inicialmente, eram triturados em moinhos de pedra manuais, que evoluíram para o de pedra movido por animais e depois para os movidos pela água e, finalmente, pelos moinhos de vento. Apenas em 1784 apareceram os moinhos movidos a vapor. Em 1881 ocorre a invenção dos cilindros, que muito aprimorou a produção de pães.

### 1.2.2 O pão no Brasil

Conforme escreveu o sociólogo e antropólogo Gilberto Freyre, o Brasil conheceu o pão no século XIX. Antes do pão, o que se usava, em tempos coloniais, era o biju de tapioca no almoço e no jantar a farofa, o pirão escaldado ou a massa de farinha de mandioca feita no caldo de peixe ou de carne.

Um cronista francês, L.F. Tollenare, viajando pelo interior pernambucano em 1816, registrou também que não era comum o uso do pão, sendo, por outro lado, prodigiosa a cultura do trigo principalmente em Campina Grande, Paraíba. Outras informações de viajantes estrangeiros em 1839 dão conta do completo desconhecimento da existência de pão pelos moradores do sertão nordestino.

No início, a fabricação de pão, no Brasil, obedecia a uma espécie de ritual próprio, com cerimônias, cruzeiros nas massas, ensalmos para crescer, afofar e dourar a

crosta, principalmente quando eram assados em casa.

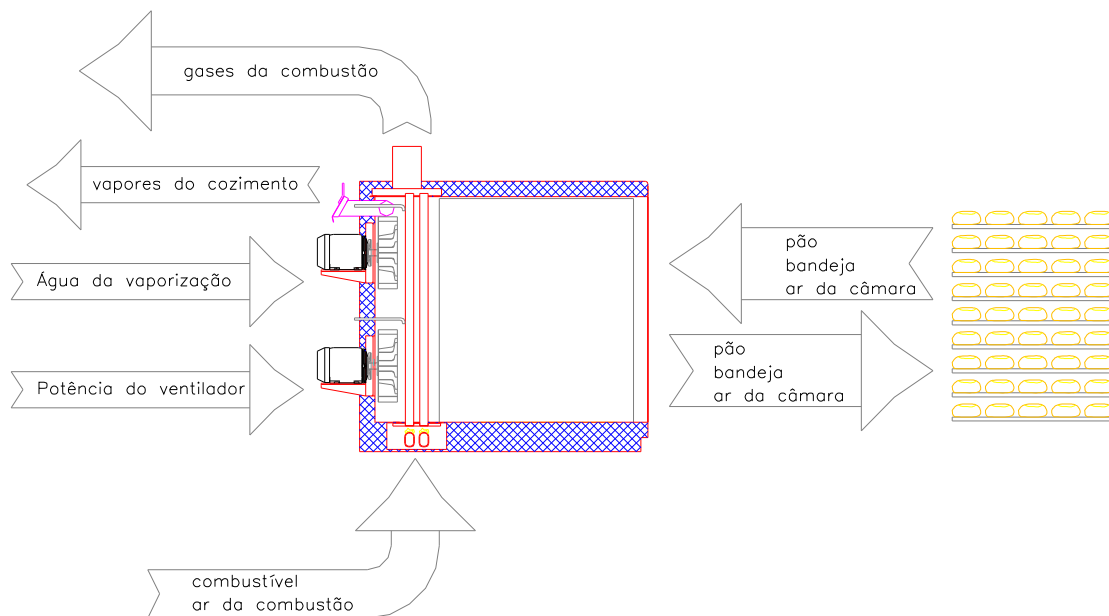
A atividade da panificação no Brasil se expandiu com os imigrantes italianos. Os pioneiros da indústria de panificação surgiram em Minas Gerais. Nos grandes centros proliferaram as padarias típicas, sendo que na cidade de São Paulo até hoje existem, em alguns bairros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Desde o século XIX com o início da construção de fornos para o cozimento comercial de pães e biscoitos a tecnologia avançou e muitos modelos de fornos foram inventados. Porém atualmente, poucos trazem inovações tecnológicas ou novas características atrativas ao consumidor. Modelos mais compactos, mais econômicos, mais fáceis de operar e manusear, projetos voltados para as questões ambientais, que devem ser preocupações do futuro deste mercado. Pensando nisso, um projeto de forno para pães, movido a gás natural, com bom rendimento, isto é, o melhor dimensionado possível, é a finalidade deste trabalho.

O primeiro passo será calcular o coeficiente de transferência de calor para fornos de cozimento de pães e biscoitos, através do balanço térmico do forno, isto é a primeira lei da termodinâmica. O balanço leva em conta todos os calores que entram e saem do forno durante o cozimento, conforme a figura 1.

FIGURA 1 – BALANÇO TÉRMICO - CALORES QUE ENTRAM E SAEM DO FORNO.



FONTE: O AUTOR

Deve-se salientar que o processo de cozimento é intermitente e que o forno deve atingir a temperatura correta antes de iniciar o cozimento.

O calor  $Q_1$  é o calor útil para o cozimento, e será a finalidade deste balanço, na realidade significa o calor da massa do pão antes do cozimento menos o calor da massa depois do cozimento (ver fórmula 25). Sabendo-se este valor de é possível determinar o coeficiente de transferência de calor ao forno.

De acordo com *Rahman (1995)*, um grande número de esquemas para a circulação do ar pode ser aplicado em diferentes tipos de fornos, os quais geram diferentes perfis de velocidade do ar e transferência de calor. O coeficiente de transferência de calor em fornos para o cozimento por convecção deve ser de 20 à 60  $W/m^2K$ . A velocidade do ar deve estar entre 5 e 9 m/s e a temperatura entre 150 e 250°C

Já em *Carson, Willix & North (2004)*, que fizeram um ensaio medindo o coeficiente de transferência de calor em fornos de convecção através de quatro métodos diferentes. E encontraram os seguintes valores: Para fornos industriais o coeficiente de transferência de calor é 10 à 40  $W/m^2K$  e a velocidade do ar é de 0,2m/s à 1,9m/s.

Segundo *Rahman (1995)* a taxa de transferência de calor para alimentos em zonas mistas de convecção e radiação depende de uma série de fatores tais como: o número de Reynolds, o número de Grashof, o número de Nusselt, o ângulo entre os fluxos de ar, e o fluxo de ar natural.

## 2.1 A IMPORTÂNCIA DA RECIRCULAÇÃO INTERNA FORÇADA

A figura 2 simula o processo de transferência de calor por condução dentro do forno como se fosse feito um corte transversal nele. Através dos tubos trocadores



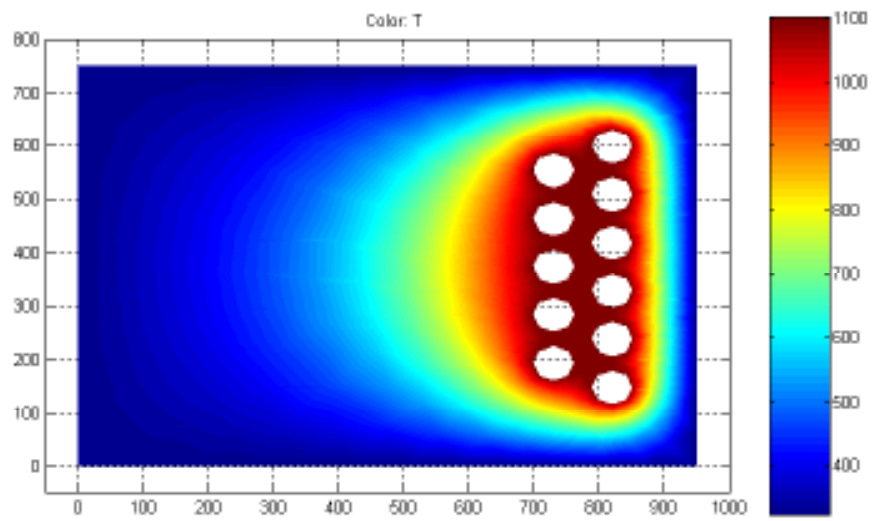
de calor passam os gases provenientes da combustão e estes seguem até a chaminé, os tubos transferem o calor da combustão do gás para dentro do forno, mas os gases da combustão não entram em contato com a câmara de cozimento. Pode-se perceber que não há uma homogeneidade da temperatura dentro da câmara de cozimento o que faz com que o pão não tenha um cozimento uniforme. A grande importância da convecção forçada através de ventiladores axiais está em circular o ar quente dentro da câmara entre os pães para obter um padrão de cozimento excelente. Isto é, todos os pães ter a mesma coloração final. Para isto a temperatura da câmara de cozimento deve ser uniforme.

A simulação foi feita no software MATLAB usando a ferramenta PDETOOL. Para as faces externas, isto é, as faces da câmara de cozimento foi usada a *condição de dirichlet* com uma temperatura prescrita de 323K, e para os tubos trocadores de calor internos foi usado a *condição de Neumann* com uma temperatura prescrita de 1100K, aproximadamente a temperatura que os gases atravessam os tubos trocadores de calor até chegar à chaminé. Com estes parâmetros o aplicativo desenvolve o cálculo, e simula o efeito da transferência de calor quando o meio é o ar.

Pode-se notar que a câmara de cozimento não tem uma distribuição de calor uniforme, pois nestas condições simuladas o ar não circula. A face oposta aos trocadores de calor tem pouca troca de calor e sua temperatura quase não varia. Logo se não houver uma circulação de ar forçada na câmara não haverá uma distribuição de temperatura homogênea dentro do forno.

A barra colorida ao lado da figura em corte do forno mostra os valores do gradiente de temperatura do forno em Kelvin. E os eixos estão com as dimensões do forno em milímetros, o diâmetro dos tubos trocadores de calor é 35mm a largura da câmara é 760mm e o comprimento da câmara é 940mm.

FIGURA 2 – SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO FORNO



FONTE: O AUTOR

### **3 DADOS TÉCNICOS SOBRE PÃES E BISCOITOS**

#### **3.1 INGREDIENTES E SUAS FUNÇÕES**

##### **3.1.1 Farinha de trigo**

A farinha de trigo é a única entre as farinhas de cereais que quando misturada com água nas corretas proporções faz as correntes de proteína (nela contida) formar uma massa elástica a qual é capaz de aprisionar gases e que vai formar uma estrutura esponjosa que quando aquecida no forno, forma o pão que conhecemos. As correntes de proteínas são responsáveis pela forte estrutura da massa, porém, quando a massa é estendida alguns desses elos são quebrados causando uma permanente deformação, enquanto que algumas permanecem intactas mantendo a estrutura rígida da massa, com isso a presença da mistura amido + água é fundamental, para tornar a estrutura mais rígida e diminuir a elasticidade do pão.

Quando a farinha é umedecida, as partículas de proteína são re-arranjadas de uma maneira heterogênea. A ação dos misturadores de massa é fundamental tende a orientar as partículas de glúten em um padrão heterogêneo, isto é, os filamentos de proteína pelo movimento dos batedores são arranjados de forma paralela. Quando este ponto é alcançado a massa adquire uma maciez que indica que a distensão da mistura está adequada, isto se deve ao glúten e sua capacidade de alongar-se como uma mola.

A importância de uma mistura intensiva do bolo de massa é porque a ação de uma mistura vigorosa vai incorporar bolhas de ar para dentro da massa as quais devem mais tarde expandir durante o cozimento dentro de finas células necessárias à própria textura no acabamento da massa.

A composição da farinha de trigo depende da variedade e das condições na qual o grão germina, porém análises mostram que os limites estão dentro de um padrão

conforme a tabela 5. As proteínas contidas são de grande importância para o cozimento do pão e para a formação do glúten, porém outros constituintes também têm papel fundamental na preparação do pão.

TABELA 5 – A COMPOSIÇÃO DAS FARINHAS DE TRIGO

<b>Constituinte</b>	<b>Percentual mínimo (%)</b>	<b>Percentual máximo (%)</b>
Proteínas	7,5	15,0
Sais Minerais	0,3	1,0
Gordura	1,0	1,5
Fibra	0,4	0,5
Carboidratos como o Amido	68,0	76,0

FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING - 1960

Nas paredes destas finas células de gás na massa foi encontrado um material de característica glutinosa formado por 45 por cento de proteínas e 25 por cento de amido em base seca. Há então uma tendência do amido e o glúten se separar durante a fermentação e do glúten formar células transparentes. Isto leva a conclusão que o amido não é necessário à formação de células gasosas na massa. Na superfície do pão um filme é formado porque os núcleos de gás dos quais as bolhas se originam são secções glutinosas, as bolhas vão expandindo e requerendo mais glúten para satisfazer a superfície necessária que foi formada da matriz amido-glúten. As propriedades que tornam possível isso ocorrer podem ser controladas pela viscosidade e fluidez do glúten e a quantidade de adesão do glúten no amido.

Tomando em conta isso, a importância de uma intensiva mistura do bolo de massa para introduzir bolhas de ar, que mais tarde no cozimento vão expandir e dentro de finas células vão propiciar um fino acabamento da massa. A quantidade de gás necessário para a expansão poderia vir de várias fontes, incluindo leveduras químicas, para desenvolver o vapor durante o cozimento ou para expansão das bolhas de ar

ocultas em temperatura de cozimento.

### 3.1.2 Fermentos

As funções dos fermentos são aliviar a massa e dar a ela uma característica de aroma e sabor. Este era o papel dos fermentos até trezentos anos atrás, desde que sua existência foi reconhecida, hoje se sabe que eles têm outras propriedades. Os fermentos podem ser divididos em duas categorias os biológicos e os bioquímicos. A utilização do fermento tem aumentado progressivamente através de modificações científicas na manufatura do mesmo e no aumento do conhecimento do processo de fabricação dos pães e biscoitos.

Os fermentos **biológicos** basicamente são formas ovais, unicelulares, sem cores, plantas microscópicas chamadas de *Saccharomyces Cerevisiae*, que se reproduzem com grande facilidade. Existem ainda outras formas de fungos usados como fermento, mas o importante é o papel desempenhado por eles, isto é, sua função criar atividade química suficiente para converter o açúcar presente na massa em energia, e formar novas combinações químicas e novos nutrientes inorgânicos e orgânicos. A fermentação é o principal mecanismo de formação de energia.

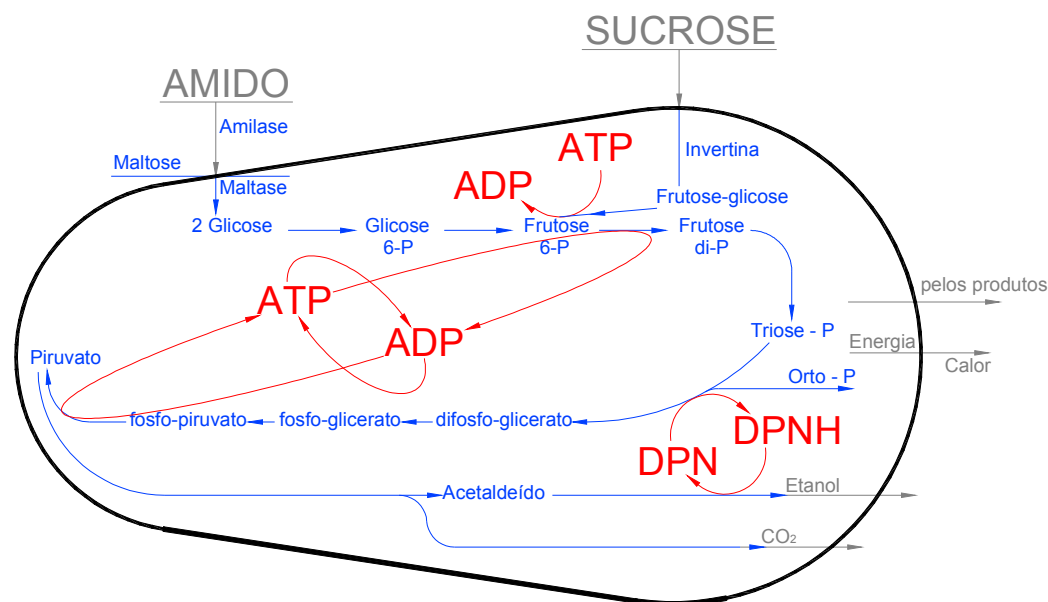
O fermento **bioquímico** muito antes de ser conhecido, era distinguido visivelmente ou por certas transformações do paladar de extratos de frutas e grãos. Os antigos egípcios já conheciam a ação do fermento desde 2600a.C. e faziam pães com métodos similares aos conhecidos hoje. O fenômeno da fermentação era conhecido como uma alteração química onde uma molécula de açúcar era transformada em duas moléculas de dióxido de carbono e duas de álcool etílico.

Na presença do ar o crescimento do fermento é rápido e acumula pouco

álcool (respiração aeróbica); sem ar o crescimento do fermento é lento mas a formação do álcool é aumentada (respiração anaeróbica), ao lado do álcool e dióxido de carbono outros componentes, tais como glicerol e ácido succínico aparecem nesta fermentação.

Intensas pesquisas foram realizadas no processo de fermentação, isto é na seqüência de mudanças bioquímicas, e surgiram muitos detalhes de complexos mecanismos de reação. Os principais passos são demonstrados na figura 3, ilustrando o metabolismo do carboidrato do fermento: primeiro passo hidrolisar os carboidrato para permitir a passagem do açúcar através das membranas da célula; o segundo é a modificação do açúcar através do adenosina trifosfato (ATP) para iniciar as reações de formação de energia; terceiro é a decomposição dos fosfatos de açúcar e seus intermediários anaerobicamente em dióxido de carbono, álcool etílico e ATP adicional e o quarto é a formação de constituintes da célula, sintetizados com o auxílio do ATP.

FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO METABOLISMO DOS CARBOIDRATOS E FERMENTAÇÃO



FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING - 1960

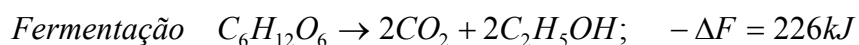
Logo o ATP serve como uma ligação entre as reações metabólicas liberando energia e o processo de construção da célula requerendo energia, durante a

fermentação são produzidas quatro moléculas de ATP sendo que dessas duas são consumidas pelo processo de construção. As séries de oxidações e reduções internas dentro da célula (as fases dois e três acima) são conhecidas como caminho da glicólise ou fermentação propriamente dita, a reação de cada par de intermediários é catalizada por enzimas específicas e co-fatores livremente suspensos na célula. Por esta fermentação anaeróbica o dióxido de carbono é proveniente de três à quatro átomos de carbono do açúcar.

Outros sistemas para metabolismo dos carboidratos existem no fermento. O principal sistema aeróbico, o ciclo de Krebs ou a reação do ácido tricarboxílico, para o qual oxidar o piruvato para a água e dióxido de carbono ocorre na estrutura intracelular chamada mitocôndria. O dióxido de carbono deste sistema é derivado igualmente dos seis átomos de carbono do açúcar. De menor importância é a operação de oxidação da glicose-6-fosfato, onde o dióxido de carbono é liberado preferencialmente para o açúcar carbono 1. O caminho aeróbico é o que libera mais energia.

Existem mais de 230 tipos de reações na fermentação, desses apenas oito são considerados para a performance da fermentação, pois são os mais freqüentes, são eles: Redução, descarboxilação, deaminação, oxidação, esterificação, condensação, hidrólise, aminação.

Quando a levedura é colocada em açúcar diluído e adequadamente aerado, o açúcar é utilizado exclusivamente pela respiração aeróbica. Na ausência do oxigênio, ou com grandes concentrações de açúcar, a respiração anaeróbica se manifesta, liberando apenas oito por cento da energia liberada pela oxidação. A energia restante no álcool pode ser obtida por oxidação.



Altas condições aeróbicas são necessárias para produzir a máxima

fermentação na massa, porém tanto o sistema da oxidação quanto o da fermentação são quase igualmente providos de energia biológica para formar novas células. Tais mudanças nas condições de crescimento também produzem variações na composição do fermento. Dentro das ações das leveduras na massa, a reação de fermentação predomina. Sessenta por cento da energia liberada pela fermentação (226kJ) é dissipada como calor.

O papel da fermentação na fabricação do pão é primariamente: a formação e migração do dióxido de carbono culminando em uma cadeia de compartimentos celulares, ocupando cerca de 0,4 dm<sup>3</sup>/kg de massa, fazem aliviar ou aumentar a massa, portanto melhorando o paladar do pão. E em segundo lugar a simultânea produção e concentração de álcoois, aldeídos, cetonas e ácidos contribuindo para o aroma e sabor do pão.

### 3.1.3 Água

A água é o composto mais abundante da terra e também presente nas células vivas. Ela é indispensável para todos os sistemas biológicos. A função principal da água nas receitas é hidratar os ingredientes e na massa encontra-se normalmente em setenta por cento das células. A água livre que fica disponível para a fermentação representa um ganho durante a hidrólise, isto é, a inversão da sucrose resulta 5,26 por cento a mais na fermentação do açúcar, então 100 gramas de sucrose mais 5,26 gramas de água geram 52,63 gramas de dextrose mais 52,63 gramas de levulose.

É essencial a adição de água na massa para a formação do glúten, o qual é fundamental para as massas de pão. A água também é necessária para ser absorvida pelo amido, e para ligar intimamente os ingredientes da massa para que reações complexas do preparo do pão aconteçam. Cada ingrediente carrega consigo um pouco



de água, pois tem um pouco de umidade, e esta água vai também fazer parte da massa.

Quanto mais os outros ingredientes absorvem a água melhor fica a qualidade da massa e isso significa que a água tem melhores propriedades. A água representa uma grande quantidade da massa do pão. Pequenas quantidades de ingredientes ativos que estão presentes na água podem ter efeitos distintos nas propriedades da massa. Em geral água de média dureza (entre 50 e 100ppm), com pH neutro ou levemente ácido é preferido para o uso no cozimento. Águas excessivamente alcalinas podem adversamente afetar a fermentação, aumentando o pH da massa de um ponto acima do ótimo, pH de 4 à 5, no qual o fermento e enzimas da farinha agem. O uso de agentes acidulantes (ácido acético ou ácido láctico) ou melhoradores podem ser adicionados a massa para corrigir efeitos de águas muito alcalinas. Água muito mole pode resultar em uma massa muito viscosa por causa da ausência de minerais que endurecem o glúten. Água muito dura pode retardar a fermentação, pois há um grande enrijecimento do glúten. Este efeito adverso pode ser corrigido trocando o suprimento de água ou aumentando os níveis de fermento e diminuindo os níveis de melhoradores na massa.

#### 3.1.4 Leite

Certos tipos de mudanças ocorrem quando o leite é adicionado na massa. Estas mudanças manifestam-se em diferentes tempos e de maneiras diferentes durante a fabricação da massa e o cozimento. O tamanho do pão tem influência com a adição de leite na massa em média o pão aumenta de cinco a dez por cento de volume. A fermentação é também um processo que aumenta a acidez da massa, a adição de leite na massa vai tornar o desenvolvimento do ácido mais lento resultando em menores níveis de ácidos que o pão correspondente com água na massa, para um período de fermentação completa.

### 3.1.5 Gordura

As gorduras são essenciais para muitos tipos de produtos de panificação e confeitaria. No cozimento as gorduras são principalmente usadas em *cookies*. Ela é usada também nos recheios de bolachas tipo sanduíche. Nas massas tem excelente estabilidade e valor, e tem melhor capacidade para formar creme. O sabor natural e baixo ponto de fusão são considerados desejáveis na manufatura e tem fundamental importância no sabor e qualidade. As gorduras podem ser divididas em animais e vegetais, porém existem certas propriedades com as quais podem se classificar as gorduras: sabor suave, aparência branca, boa plasticidade, estável a oxidação e saboroso.

### 3.1.6 Açúcar

A quantidade de açúcar usado em pães ou biscoitos é totalmente dependente da receita utilizada, isto é, o tipo de produto que será feito e a quantidade de açúcar que vai nele é às vezes uma questão de tradição. Desenvolvimento de crosta na coloração adequada e o aumento da massa dependem da quantidade de açúcar diretamente. Este açúcar está naturalmente presente na massa e na maltose formada por enzimas do amido e da farinha. Quantidades de até dois por cento de açúcar são facilmente consumidas pela fermentação, quantidades maiores podem ser usadas mas requerem uma menor mistura e um aumento no tempo de cozimento, em pães geralmente não se ultrapassa este valor. Existem vários tipos de açúcares presentes nas massas, nem todos são fermentáveis:

Açúcar naturalmente presente na farinha são: a glicose, a maltose, a frutose (que são fermentáveis) e os oligosacarídeos que não são.

Maltose formada pela ação da alfa amilase no amido da farinha.

Açúcares adicionados á massa são o: açúcar (sucrose), a frutose (levulose), a glicose (dextrose) e a maltose, este último está presente em caldas de cereais e produtos maltados.

Polisacarídeos os quais estão presentes nas caldas de cereais e maltes. Eles não são fermentáveis.

Lactose que está presente no leite e seus derivados.

O açúcar livre contido na farinha de trigo é de aproximadamente um por cento e a taxa na qual ele torna-se fermentado depende da maneira como o fermento é empregado.

### 3.1.7 Enzimas e melhoradores

Enzimas e melhoradores são compostos nitrogenados formados por células vivas, para o propósito de aceleração de reações celulares de digestão, fermentação, síntese e transporte de metabólitos. Nestas funções catalíticas as enzimas não são consumidas. Entretanto, sua performance é influenciada pela temperatura, pH , concentração de reagentes,etc... Cada enzima tem uma função específica, causando somente um tipo de reação. A evolução tecnológica nessa área tem sido constante e o tempo de fermentação graças ao descobrimento de novas enzimas e melhoradores têm reduzido drasticamente melhorando o processo e o sabor.

### 3.1.8 Sais minerais

São oito elementos minerais os essenciais para o crescimento do fermento, alguns deles estão contidos em enzimas e constituintes da fermentação, os mais abundantes e importantes são: magnésio, fósforo, potássio, sódio e enxofre. Outros componentes apresentam uma pequena quantidade, mas são essenciais para a

propagação da fermentação são: ferro, zinco e cobre.

### 3.2 O PROCESSO DE COZIMENTO

Para se construir um forno para cozer uma massa deve-se saber perfeitamente que tipo de produto será produzido nele. Basicamente os fornos são compostos de esteiras de aço ou bandejas, cercados por uma caixa de isolamento térmico, e equipados com aquecimento suficiente para cozer satisfatoriamente o produto. O projeto do aquecimento pode ser mais correto possível se o processo de cozimento é conhecido ou dominado. As principais reações que acontecem no processo de cozimento são divididas em duas classes: as mudanças físicas e as mudanças químicas. Estas reações devem ocorrer em uma ordem própria, e em uma temperatura específica, em um correto tempo em uma atmosfera própria.

Apesar da formação de um filme revestindo a porção de massa poder ser notado apenas durante o processo de fermentação, o filme torna-se muito mais aparente quando a peça de massa é colocada dentro do forno. Comparativamente a atmosfera quente do forno gera o filme no pão e torna-o mais elástico. A elasticidade é uma função direta da umidade contida na atmosfera do forno.

TABELA 6 – TIPOS DE REAÇÕES NO COZIMENTO

Físicas	Químicas
Formação do filme	Ação do fermento
Expansão dos gases	Formação do dióxido de carbono
Redução da solubilidade do gás	Gelatinização do amido
Evaporação do álcool	Coagulação do glúten
	Caramelização do açúcar
	Reação de queima da dextrose

FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING - 1960

Um outro fenômeno físico que começa tão logo a massa é colocada no forno é a redução da solubilidade de gases retidos na massa. O gás mais ativo nesta reação é o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Ele está presente na massa, encapsulado entre as estruturas de glúten. Boa parte do dióxido de carbono está dissolvido na massa líquida ou limitado por forças fracas de outros constituintes da massa. Quando a temperatura interna do pão alcança em torno de  $48^\circ\text{C}$  as fronteiras são dissolvidas e o dióxido de carbono é liberado.

A atmosfera quente do forno também imediatamente causa expansão dos gases contidos dentro do filme elástico formado pela estrutura de glúten. Um exemplo prático da Lei de Geral dos Gases na qual é dito que: o volume ( $V$ ) de uma quantidade definida de gás em pressão atmosférica ( $p$ ) constante é diretamente proporcional a temperatura absoluta ( $T$ ), onde  $R$  é a constante universal dos gases e  $n$  é o número de moles da substância, então:

$$pV = nRT \quad (1)$$

A última das transformações físicas é a evaporação de líquidos. Os mais importantes destes líquidos são a água e o álcool. A água entra no processo como líquido e sai como vapor. O álcool etílico é produzido durante o processo de fermentação pela ação do fermento em alguns açúcares da massa. Quando a temperatura interna da massa alcança  $80^\circ\text{C}$ , o álcool começa a evaporar, aumentando a pressão interna de vapor.

A ação do fermento é contínua e começa na câmara de fermentação. No fim da fermentação quando a temperatura interna do pão alcança aproximadamente  $63^\circ\text{C}$ . Os principais produtos liberados pela fermentação são o dióxido de carbono e o álcool etílico. A produção de dióxido de carbono aumenta quando a temperatura alcança  $63^\circ\text{C}$ .

Quando o amido e a água fria são misturados, o amido absorve aproximadamente 30 por cento do seu peso em água, isto é a difusão de água dentro do grão causa um inchamento. Embora os grãos fiquem levemente inchados a água pode ser retirada e o amido após seco pode retornar ao seu estado original, sem nenhuma mudança permanente. Como a mistura é aquecida à 54°C uma irreversível mudança acontece, ocorre a ruptura das pontes de hidrogênio, e subseqüentemente as moléculas de água tornam-se hidroxil anexo ao amido, os grãos de amido começam a absorver água muito rapidamente até inchar e aumentar várias vezes o seu tamanho original. Esta reação é conhecida como gelatinização do amido. A água em uma parte amorfa do amido age como um plastificador para diminuir a temperatura de transição. As temperaturas de gelatinização são principalmente influenciadas pela mistura de solutos e processamento e condições. Entretanto a gelatinização é um processo de fusão pelo calor presente na água. Conforme *Rahman (1995)* os passos da gelatinização podem ser conhecidos como os seguintes:

Grãos hidratam-se e incham e depois retornam ao tamanho original.

Grão perde a sua bi-refringência

Clareza da mistura aumenta

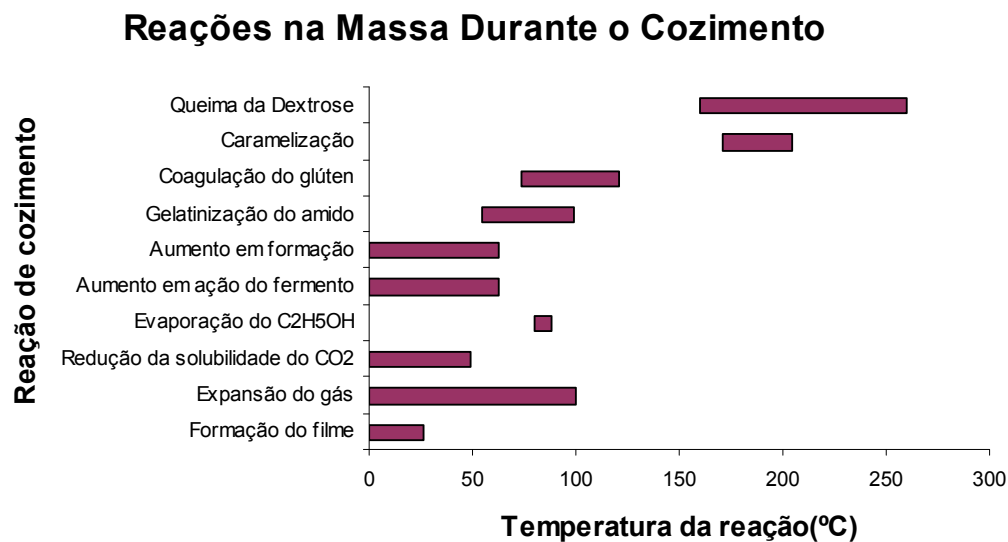
Rápido aumento da consistência ocorre e alcança o máximo

Moléculas lineares dissolvem e difundem a ruptura de grãos

Forma matricial é dispersada formando um gel ou uma pasta.

O gráfico 1 mostra a temperatura na qual estas reações acontecem.

GRÁFICO 1 – REAÇÕES QUE OCORREM NA MASSA DURANTE O PROCESSO DE COZIMENTO.



FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING – 1960

As proteínas que compõem o glúten da massa são sujeitas a uma desnaturação irreversível quando eles são aquecidos a altas temperaturas. Esta desnaturação é caracterizada pela diminuição da solubilidade e extensibilidade das fibras das proteínas. Como resultado, as paredes das bolhas tornam-se estáveis, e a expansão virtualmente cessa. Esta reação começa em aproximadamente 74°C. Quando alguns açúcares como a frutose, maltose e dextrose são aquecidas a aproximadamente 172°C, as moléculas combinam para formar substâncias coloridas chamadas caramelos. Esta reação, conhecida como caramelização, pode somente ocorrer na casca, porque a temperatura interna do pão nunca excede 100°C. A reação de bronzeamento ou “browning” começa por volta dos 160°C, como resultado do aquecimento de açúcares reduzidos com proteínas ou substâncias contendo nitrogênio para formar compostos chamados de *melanoidins*. Os *melanoidins* parecem-se com caramelos, e em baixas temperaturas seu gosto é similar aos caramelos, Quando alcançam temperaturas acima de 245°C as *melanoidins* tornam-se pretas, amargas e

insolúveis. Esta é a reação que causa desagradável sabor quando o pão é queimado ou chamuscado.

A operação do cozimento do biscoito é bem semelhante ao processo do pão e é composta de três fases distintas no forno a primeira é tem o objetivo de reduzir a umidade do produto (cerca de 30% dependendo da receita), a segunda função tem o objetivo de dar cor ao biscoito e isto é conseguido graças ao processo de caramelização dos açúcares principalmente na superfície do produto, isto ajuda a melhorar o sabor, a terceira função e talvez a mais importante é a série de reações químicas e físicas que ocorrem. Neste caso a hidratação e gelatinização do amido da farinha. Outra mudança que ocorre é a combinação química de certos materiais protéicos e carboidratos para resultar em sabor e aroma ao produto, entretanto para isto acontecer as temperaturas não devem ser altas e o cozimento deve ser relativamente lento.

### 3.3 VAPORIZAÇÃO

A vaporização é talvez a mais importante reação no cozimento do pão. Em biscoitos ela é praticamente não usual, pois as receitas de biscoito possuem mais gordura e menos água.

O vapor é essencial no forno de pães por três motivos principais: a produção de uma casca brilhante, a prevenção de rachaduras na casca, e a agitação da atmosfera do forno.

O uso do vapor para agitar a atmosfera do forno tem sido ao longo dos anos substituído com sucesso por ventiladores de recirculação dos gases da câmara de cozimento. A câmara do forno pode ser agitada com o uso dos ventiladores totalmente ou parcialmente com mais economia e eficiência.



Condições de vaporização bem sucedidas em um forno dependem das características físicas do vapor e como ele é aplicado. Porém para classificá-los pode-se combinar as características físicas, temperatura e velocidade do vapor. Por exemplo: vapor “duro” é um vapor superaquecido e com uma alta velocidade. Podemos ainda ter vapor saturado, superaquecido, com baixas ou altas velocidades, entre eles combinados.

A velocidade do vapor através do orifício de injeção deve ser conhecida para reproduzir o efeito desejado. Porém podemos considerar aceita como uma boa vaporização: uma pressão baixa de vapor saturado e uma velocidade de 1 a 3 m/s. As baixas pressões de vaporização são devido à necessidade de que o vapor condense sobre a casca do pão para que se evite a formação de rachaduras na casca e a mesma permaneça brilhante. O tempo é também de grande importância, pois o pão deve condensar o vapor antes da casca atingir a temperatura de 100°C, atualmente usa-se em torno de 1 a 2 minutos de vaporização, por isso compreende-se que a velocidade do vapor é igualmente importante, quanto mais rápido é carregado o vapor para o pão, menor é o tempo disponível para um dado volume de vapor condensar sobre ele.

A transferência de calor do vapor para o pão é aumentada porque o filme formado é reduzido e a temperatura do pão aumenta rapidamente, fazendo a condensação tornar-se igualmente mais difícil.

## 4 FORNOS E SUAS CARACTERÍSTICAS

O forno é considerado a máquina chave em uma instalação, pois geralmente é a máquina que requer um investimento inicial maior, uma manutenção mais complexa e um ajuste mais delicado. É o ponto principal da produção, todas as outras máquinas servem para abastecer o forno.

Quase todos os tipos de biscoitos hoje são produzidos por fornos contínuos de esteiras. Alguns amanteigados são ainda produzidos de maneira mais artesanal em fornos de cozimento intermitente. Num forno contínuo de esteiras é possível controlar melhor as condições de cozimento tais como temperatura, o escoamento do ar, quantidade de umidade. Os tempos de cozimento são mais curtos variam de 2,5 à 15 minutos nos fornos intermitentes o tempo de cozimento é pouco maior. Uma breve história dos fornos e tipos segue abaixo:

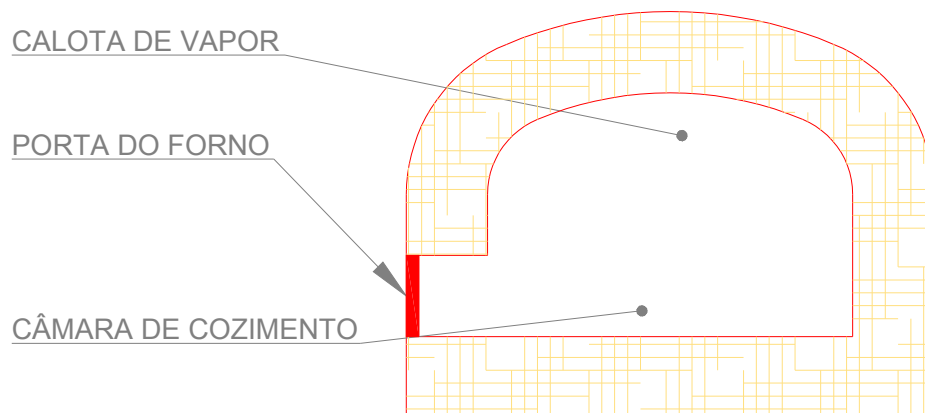
### 4.1 TIPOS DE FORNOS

#### 4.1.1 Fornos Tipo Peel

Foi usado durante séculos e ainda existem alguns exemplares principalmente em pizzarias. O forno tipo *peel* (como mostra a figura 4) originalmente tinha apenas uma abertura na frente. Os combustíveis usados são principalmente a lenha e o carvão. É alimentado pela abertura e é aceso depois queima por horas. Depois do forno alcançar a temperatura de cozimento, as brasas são afastadas e depois de uma igual distribuição de temperatura na câmara os produtos são alimentados através de uma longa pá de madeira chamada *peel*. Os pães neste caso não são alimentados ao mesmo tempo. Desta forma o pão que for colocado primeiro sai por último e o último alimentado deverá sair por primeiro, logo a coloração deles deverá ser diferente. A

vaporização apesar de rudimentar é boa pois o forno é saturado com água a qual produz um efetivo bolsão de vapor na abóbada do forno.

FIGURA 4 – FORNO TIPO PEEL



FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING - 1960

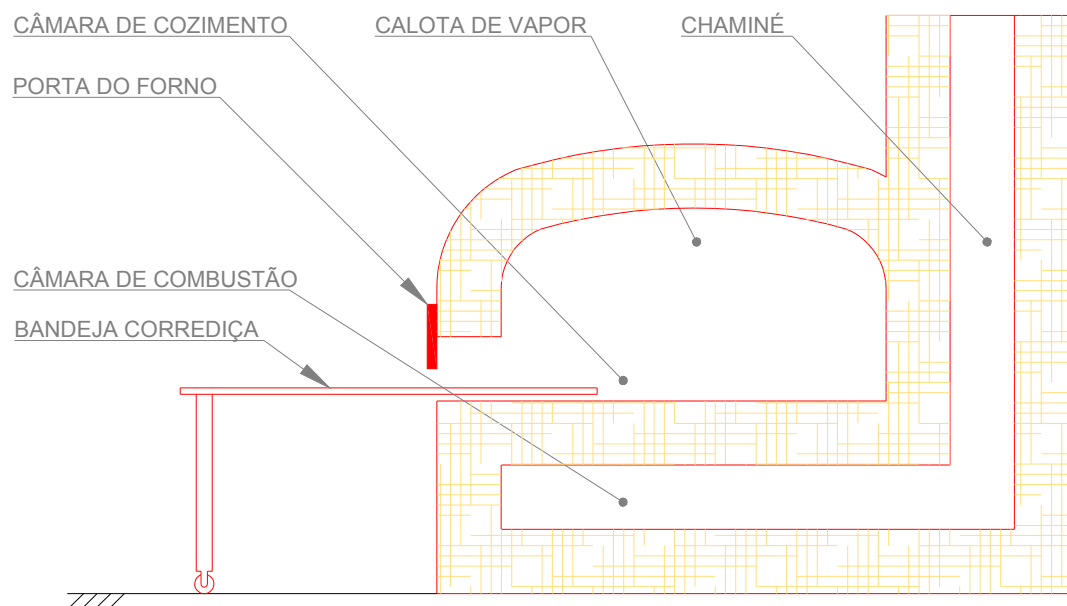
#### 4.1.2 Forno tipo Gaveta e Placa Rotativa

Estes fornos tinham a intenção de resolver o problema básico do forno tipo *peel*, a alimentação e a retirada dos produtos. Também tinham a câmara de combustão separada da câmara de cozimento o que foi um grande avanço, pois era possível alimentar o aquecimento separadamente da alimentação dos produtos, desta forma os mesmos eram providos de chaminés. O forno tipo gaveta (Fig. 5) tinha um chapa de aço na qual ficavam os produtos e que deslizava para dentro do forno algumas eram providas de roletes e trilhos. Porém mesmo assim era muito desconfortável manusear a gaveta de alimentação por causa da temperatura excessiva de trabalho.

O forno de placa rotativa (Fig. 6) tinha uma placa central que girava em torno de um eixo que era acionado por um moto-redutor. O produto era introduzido na

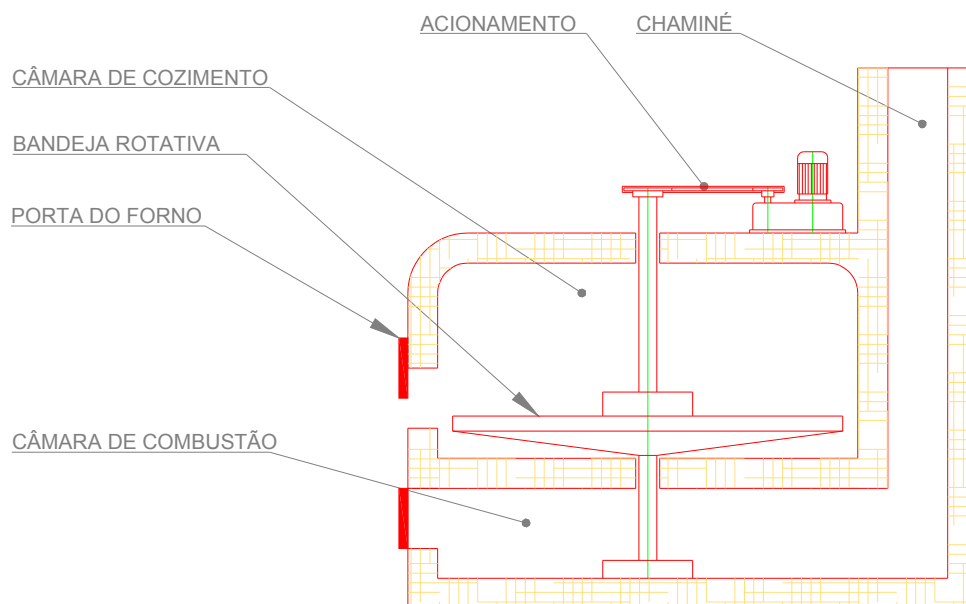
câmara de cozimento pela pá de padeiro e girava na placa rotativa até que estivesse completamente assado e então era retirado, no qual se obtinha um cozimento razoavelmente uniforme.

FIGURA 5 – FORNO TIPO GAVETA



FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING - 1960

FIGURA 6 – FORNO TIPO PLACA ROTATIVA

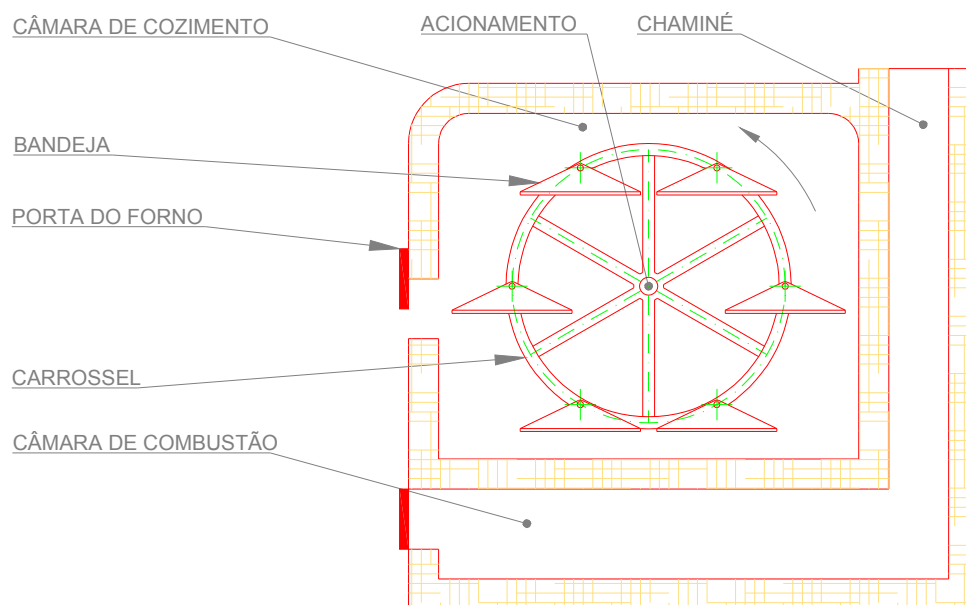


FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING - 1960

### 4.1.3 Forno tipo Carrossel

O forno tipo carrossel conforme mostra a figura 7 foi o primeiro que podia ser aquecido sistema mecânico de trilhos, moderno para a época. A câmara de cozimento era composta de quatro ou mais trilhos ou bandejas suspensas entre duas rodas formando um carrossel. Possuía níveis de posição e pivôs de posicionamento para carga e descarga. Assim que o forno atingisse a temperatura de cozimento o mesmo era alimentado e o carrossel girava até que os produtos estivessem assados, não eram necessárias as pás de padeiro, portanto mais fácil de operar. Ocupava pouco espaço, a câmara de combustão era separada da câmara de cozimento e o forno também possuía uma chaminé para os gases de escape. A objeção básica deste forno era o sistema de elevação e abaixamento do carrossel quando o mesmo estava carregado de produto. E como o aquecimento estava localizado embaixo e a câmara de cozimento era relativamente grande era difícil obter uma temperatura de cozimento uniforme em toda a câmara.

FIGURA 7 – FORNO TIPO CARROSSEL

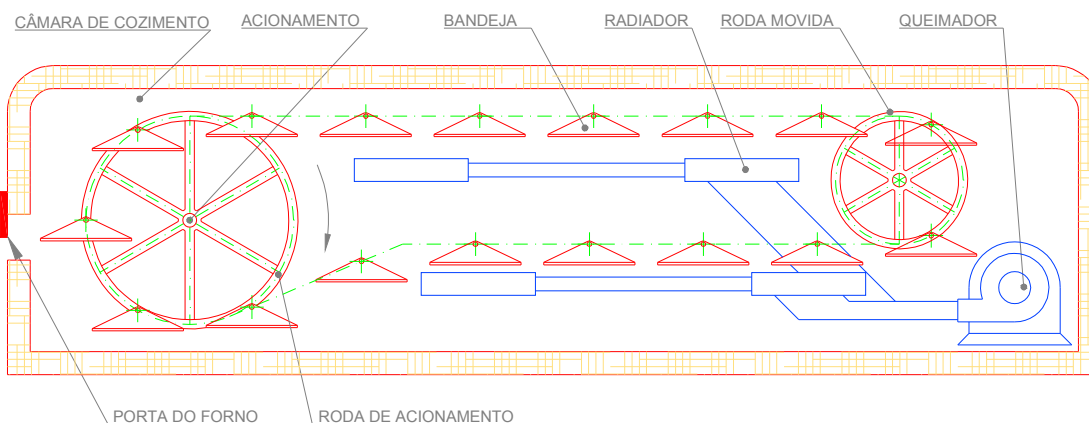


FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING – 1960

#### 4.1.4 Tipo Volta Simples

Este forno foi projetado em torno de 1928 primeiramente para economizar espaço. Entretanto teve um compromisso com a boa performance de cozimento. Porém as padarias não estavam preparadas para uma produção mais alta e demandavam muito tempo para carregar e descarregar as câmaras de fermentação, desta forma os tempos de cozimento não eram uniformes. Contudo hoje em dia produtos de igual qualidade de um forno túnel são produzidos bons projetos de fornos de volta simples quando o espaço é reduzido e a saída deve ser do mesmo lado da entrada. Este forno possui dois sistemas de guias com corrente, acionadas por quatro rodas, que atravessam a máquina, neste sistema ficam presas às bandejas conforme mostra a figura 8. O aquecimento é através de um combustor que circula o ar quente pelos dutos radiadores do forno.

FIGURA 8 – FORNO TIPO VOLTA SIMPLES

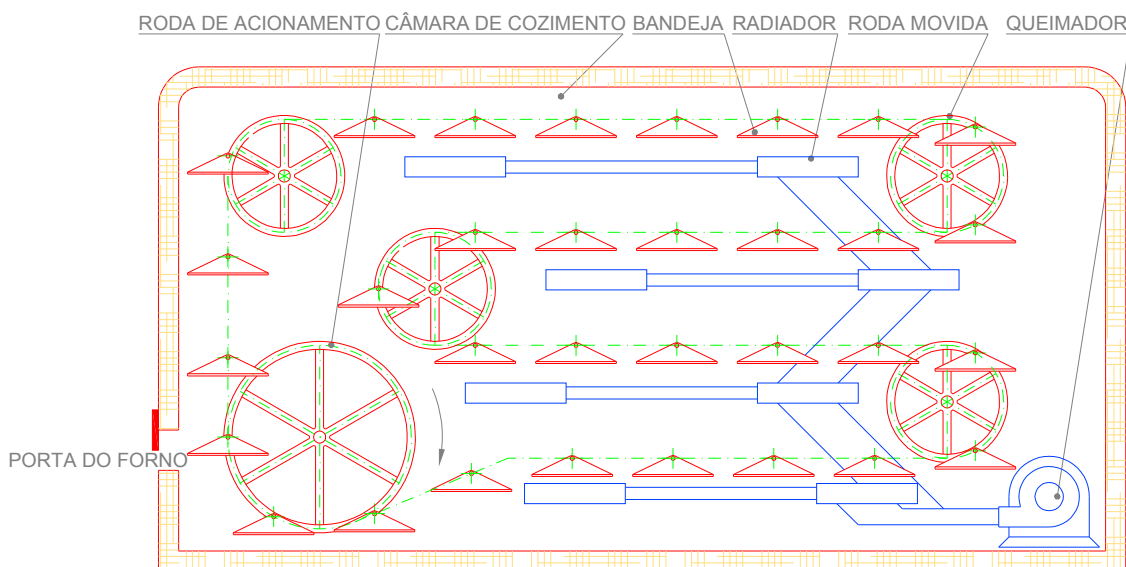


FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING - 1960

#### 4.1.5 Tipo Volta Dupla

O forno tipo túnel foi desenvolvido por volta de 1924, mas paralelamente a ele por motivo de economia de espaço, foi também desenvolvido o forno de volta dupla ver figura 9, uma opção que tivesse também uma alta produção. É muito semelhante ao forno de volta simples, na verdade ele tem uma volta a mais do sistema de corrente e possui dois pares de rodas de acionamento a mais. Existem grandes fornos de volta dupla instalados que são capazes de produzir até 5000kg de pão por hora.

FIGURA 9 – FORNO TIPO VOLTA DUPLA



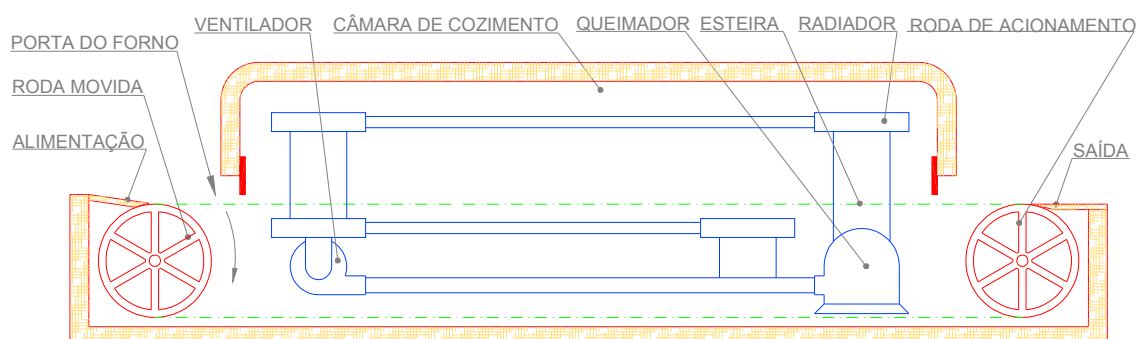
FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING - 1960

#### 4.1.6 Tipo Túnel

Em 1904 o primeiro forno tipo túnel movido a carvão foi construído e em 1913 foi re-projetado nos Estados Unidos com um aquecimento mais flexível e tornou-se o principal produto da indústria alimentícia. Entre os fornos mecânicos e a produção artesanal ele foi a ponte para as fabulosas plantas automáticas que são conhecidas hoje.

A entrada com do produto cru por um lado e saída de produto assado pelo outro, conforme mostra a figura 10, trouxe muitas vantagens de *lay-out* para as instalações que não tinham problemas com espaço. O alto desempenho do controle do aquecimento nas várias zonas ofereceu uma grande uniformidade no cozimento e uma flexibilidade no controle de temperatura de teto e lastro. Fornos longos têm muitas possibilidades de tamanhos de produtos. Os mecanismos são simples e duradouros não necessitando de uma manutenção onerosa. O único ponto negativo do forno é o alto custo inicial por suas dimensões serem maiores do que os outros modelos de fornos e seus mecanismos mais complexos.

FIGURA 10 – FORNO TIPO TÚNEL



FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING – 1960

#### 4.1.7 Fornos para biscoitos

A evolução dos sistemas de embalagens propiciou uma verdadeira revolução na fabricação de produtos alimentícios desde o início do século vinte até hoje. Cada vez mais o uso de enzimas e conservantes que fazem com que os produtos durem



muito mais fez com que surgissem as grandes fábricas de biscoitos que conhecemos hoje, verdadeiras fábulas. Com a evolução dos sistemas e controles eletrônicos, foi possível produzir grandes fornos com alto grau de controle do cozimento.

Basicamente os fornos para biscoitos são compostos de uma câmara aquecida por onde passa a esteira que conduz o produto, são fornos tipo túnel. Há três maneiras de transferência de calor presentes no forno, os combustores aquecem a esteira e a condução ocorre da esteira para o produto, alguns fornos são dotados de sistemas de pré-aquecimento da esteira. No sistema de convecção o corpo aquecido cede parte do seu calor, aumentando a temperatura do meio gasoso ao seu redor. Os combustores geram calor e estão circulando gases quentes na câmara de cozimento direta ou indiretamente. A radiação é a transmissão de calor na forma de ondas eletromagnéticas, os combustores ou os trocadores de calor são aquecidos até ficar rubros assim emitem radiação infra-vermelha. A quantidade cedida por cada tipo depende do projeto e do tipo do produto.

O forno por recirculação de calor é dotado de grandes combustores exteriores que sopram através de ventiladores o ar quente para dentro da câmara de cozimento, desta forma é necessário praticamente um combustor por zona de cozimento que tem aproximadamente quinze metros cada uma, um forno é composto por várias zonas de aquecimento pois cada uma tem uma finalidade no cozimento do biscoito. Um moderno forno de crackers possui cerca de 90 metros de comprimento e suas temperaturas variam de 305°C na primeira zona à 250°C na última.

#### 4.2 A TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA EM FORNOS

Um forno é projetado levando em conta as formas de transferência de calor que são a convecção, radiação e condução. Antigamente a radiação era a mais

importante forma de transferência de calor em fornos alimentícios. Gradualmente os projetos foram sendo re-elaborados de forma a aproveitar as vantagens da convecção forçada que hoje em dia tem o mesmo grau de importância.

A eficiência da transferência de calor por radiação varia com a temperatura do radiador e a absorção média na qual o produto está sendo cozido. A quantidade de calor transferido é proporcional a quarta potência da temperatura absoluta. Outros fatores tais como a forma, a cor e a superfície afetam a maneira como o produto absorve esta quantidade de calor irradiado.

A condução é responsável por uma pequena parte da transferência de calor, porém não pode ser ignorada. A forma da câmara, da bandeja e o produto devem ser analisados quando se considera a condução. Uma vez definido o tipo de forno a ser usado, a câmara e a bandeja ou esteira, pouco pode ser feito para aumentar ou diminuir a transferência de calor por condução.

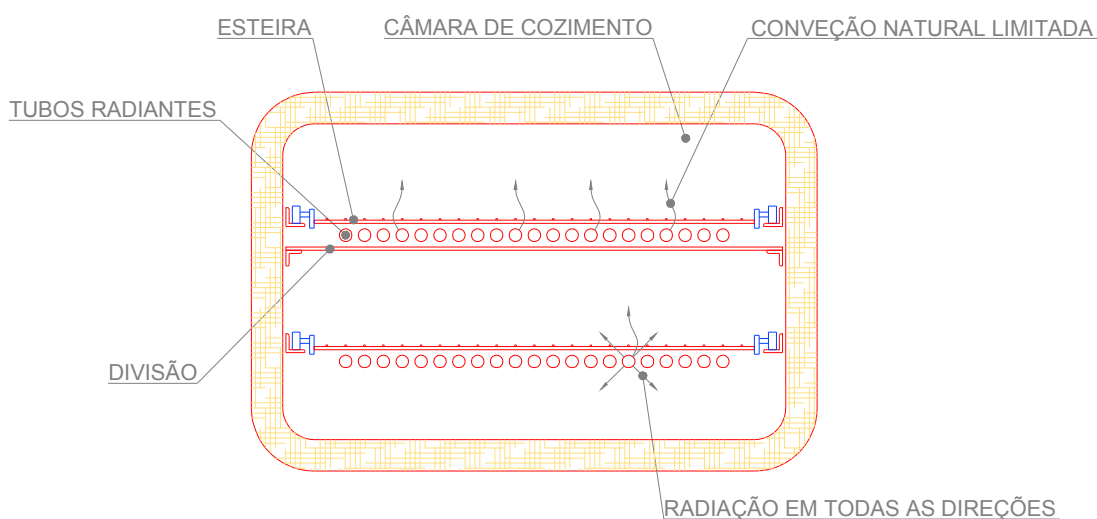
A convecção é uma forma de transferência de calor que mais evoluiu nos últimos anos devido à capacidade cada vez maior de se estimar, calcular e avaliar os desempenhos dos fornos. Algumas das mais importantes variáveis devem ser consideradas nos cálculos de transferência de calor por convecção forçada: a densidade do fluido, a viscosidade e a velocidade. O tamanho, o formato, a temperatura e a superfície do objeto ao redor do qual o fluido é forçado é importante. A convecção forçada tem melhorado a eficiência de fornos porque o calor é extraído dos aquecedores mais eficazmente e transferido ao produto com melhor resultado. A figura 14 mostra um forno de convecção forçada.

O forno de calor re-circulado tem uma eficiência em média de cinquenta por cento, bem maior do que o aquecimento direto, por que no forno de convecção forçada a manta de umidade é soprada mecanicamente para fora e o produto pode então receber um novo calor, proporcionando uma maior eficiência e uma redução no custo.

Uma velocidade maior do ar melhora sensivelmente a transferência de calor ao produto.

Quando discutimos o aquecimento de fornos os termos direto e indireto referem-se ao local dos produtos da combustão dos combustores e não do trocador de calor propriamente dito. A radiação é, sem dúvida, direta para o produto, mas os produtos de combustão são re-circulados através de tubos trocadores, portanto não entram em contato com os pães ou biscoitos. Abaixo a figura 11 mostra um exemplo de radiação indireta:

FIGURA 11 – SISTEMA DE AQUECIMENTO COM RADIAÇÃO INDIRETA



FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING – 1960

No sistema de aquecimento direto os produtos de combustão são re-circulados naturalmente ou por ventiladores diretamente na câmara de cozimento e entram em contato direto com o produto.

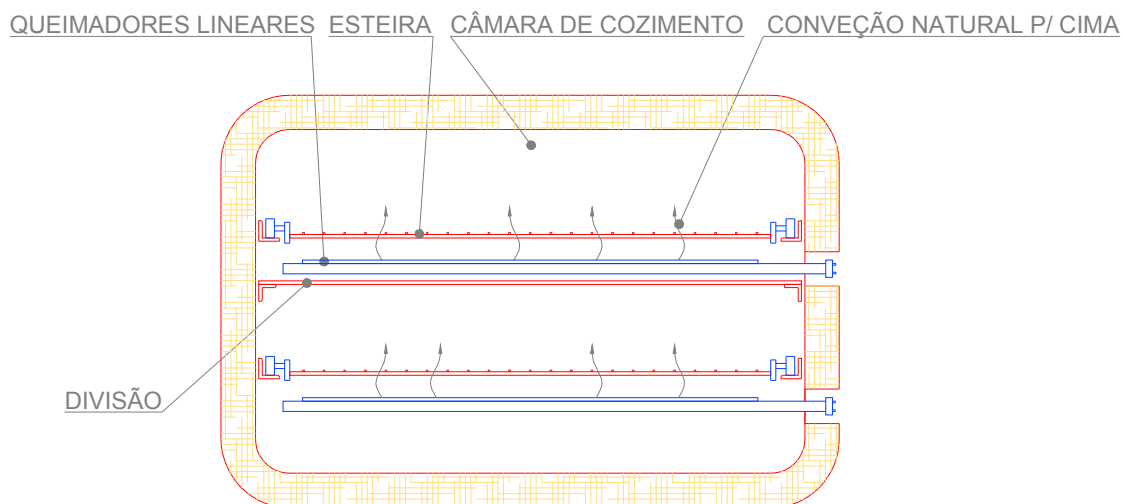
Primeiramente é bom esclarecer alguns termos usados em projetos de fornos:

**Aquecimento relâmpago** - é uma quantidade de calor abundante no início do cozimento para retirar o máximo de umidade do produto nesta fase do cozimento.

**Aquecimento sólido** - é a condição de aquecimento do forno para uma produção estável com o forno continuamente preenchido. **Fôrma relâmpago** - é uma fôrma de pão preenchida com água ou outro tipo de substância para absorver o calor inicial do forno (aquecimento relâmpago) antes de começar a produção contínua. **Aquecimento lateral** - A igual ou desigual distribuição de calor através da lateral do forno. **Aquecimento de teto** - Calor radiante ou forçado descendente na parte superior do produto. **Aquecimento de lastro** - Calor radiante ou forçado ascendente na parte inferior do produto. **Zona** - Porção do sistema de aquecimento controlada independentemente.

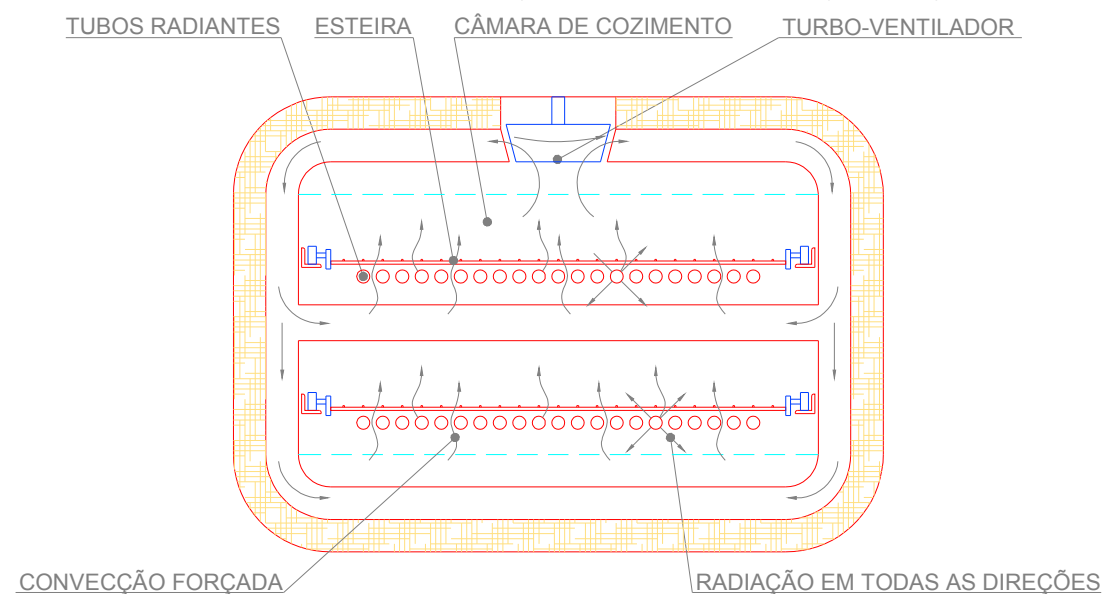
A figura 12 mostra um forno aquecido por uma combinação de radiação indireta e convecção forçada, e na figura 13 um sistema de convecção forçada direta, em ambos a presença de um ventilador de circulação de gases se faz necessário, para aumentar a convecção.

FIGURA 12 - SISTEMA DE AQUECIMENTO POR CONVECÇÃO NATURAL DIRETA COM COMBUSTORES LINEARES.



FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING – 1960

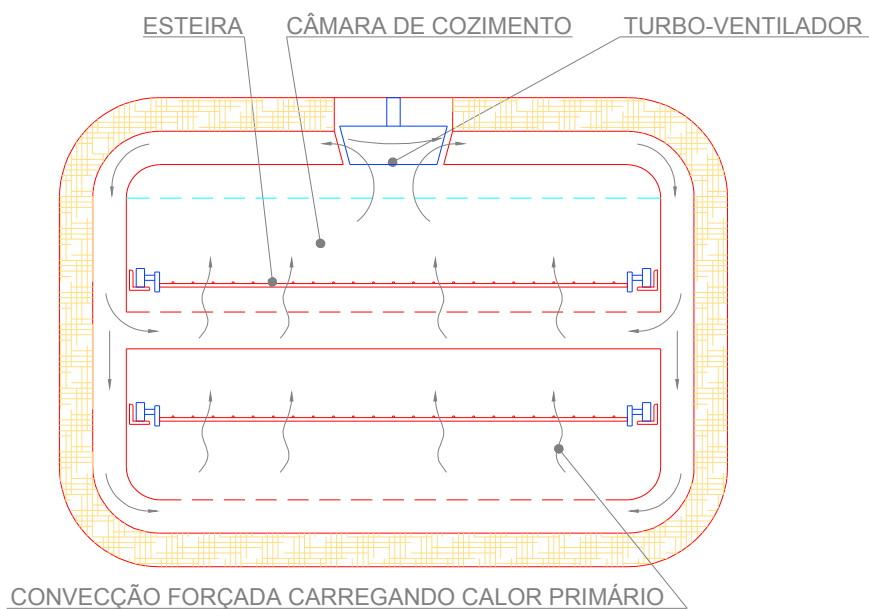
FIGURA 13 – FORNO AQUECIDO POR RADIAÇÃO INDIRETA E CONVECÇÃO FORÇADA



FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING – 1960

A figura 14 mostra um forno com re-circulação dos gases provenientes da combustão isto é o aquecimento é direto.

FIGURA 14 – SISTEMA DE AQUECIMENTO COM CONVECÇÃO FORÇADA DIRETA

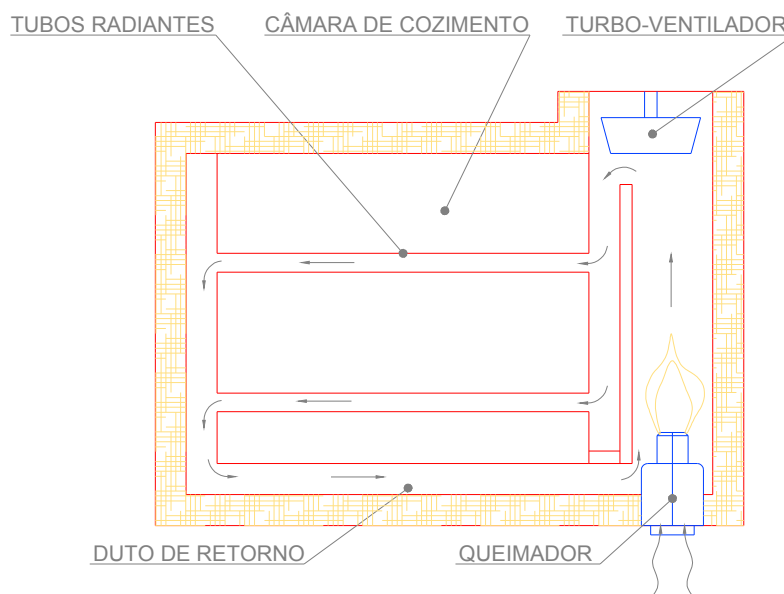


FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING – 1960

A figura 15 mostra uma vista lateral de um forno em corte onde é possível

visualizar o combustor, o ventilador recirculação dos gases, os dutos de circulação dos gases e os tubos trocadores de calor.

FIGURA 15 – VISTA LATERAL DO SISTEMA DE AQUECIMENTO COM TUBOS RADIANTES



FONTE: MATZ, SAMUEL A. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING – 1960

## 5 FONTES DE ENERGIA USADAS EM FORNOS

Os custos das fontes de energia usadas nos fornos estão cada vez mais altos, e a proporção em relação ao custo dos pães e biscoitos está cada vez maior. Logo está crescendo a preocupação por melhorar a eficiência dos combustores e do cozimento de maneira a consumir menos combustível. Por isso o projeto do forno é muito importante, diga-se vital para melhorar a eficácia do mesmo, a otimização dos pontos principais do projeto e a inclusão de maior controle sobre as condições do cozimento, isto é, maior instrumentação para o operador.

Muitos diferentes tipos de combustíveis podem ser usados em sistemas de aquecimento dos fornos na indústria alimentícia. Dentre os principais estão inclusos o gás natural, GLP, lenha, óleo diesel, carvão e energia elétrica.

Conforme visto no capítulo 4, existem no mercado vários modelos diferentes de fornos para fabricação de pães e biscoitos, muitos deles usam óleos combustíveis. Com o aumento contínuo do preço dos derivados de petróleo, devido ao aumento do preço internacional do barril do petróleo, esses combustíveis derivados do mesmo estão cada vez mais caros, gerando um certo desinteresse por equipamentos movidos por esses combustíveis. O mesmo ocorre com a energia elétrica, apesar de não poluir como os outros combustíveis, tem se tornado cada vez mais cara, onerando o custo dos produtos. A lenha por fatores logísticos exige uma demanda muito grande de estoque da madeira em local seco, não é atrativa aos mercados e indústrias de grande porte e comparando com combustíveis gasosos a lenha é a que gera mais CO<sub>2</sub>.

O aumento da produção e da demanda do gás natural devido a melhoria da distribuição através das companhias de gás locais e também ao gasoduto Brasil-Bolívia, tem tornado esse combustível cada vez mais acessível e barato e por questões ambientais, isto é, dentre os combustíveis orgânicos é o que menos polui, portanto,

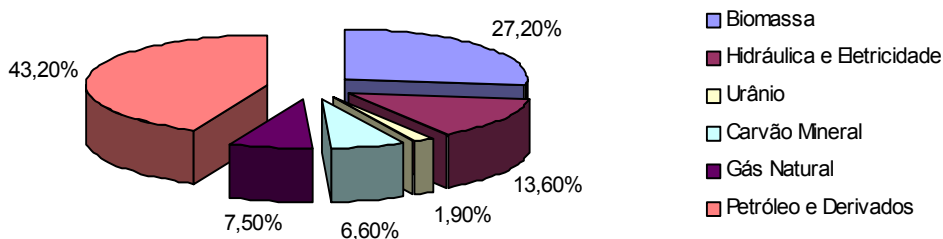
pelas suas características é o combustível mais atrativo atualmente. O consumo de gás natural no Brasil foi em 2001 de 6,5%, e aumentou em 2002 para 7,5%, isto representou um crescimento de 15,3%, e a tendência é aumentar a cada ano.

O governo brasileiro tem demonstrado interesse em incentivar as políticas para o uso de gás natural, uma das provas recentes é a divulgação da implantação do eixo que vai ligar os gasodutos em toda a extensão do litoral nordeste com os gasodutos das regiões sudeste e sul.

As reservas de gás natural brasileiro são da ordem de 236,6 bilhões de m<sup>3</sup>, o que equivale à cerca de 15,2 anos da atual produção, sem contar com a reserva de gás natural boliviano e as reservas que ainda serão descobertas. Sendo que a média dos países exportadores equivale a 14,1 anos de produção.

Nos gráficos 2 e 3 é possível comparar a oferta de energia mundial com a oferta de energia no Brasil e verificamos que a oferta de gás natural no mundo é de 21,1%.

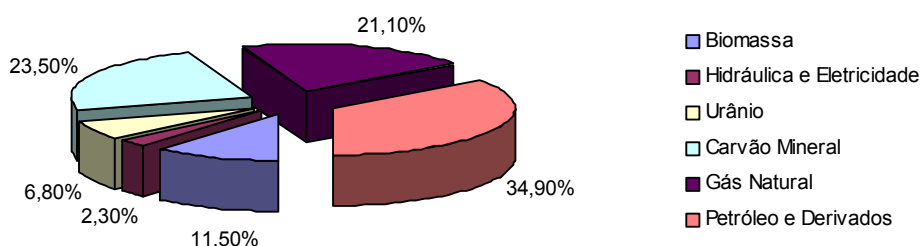
GRÁFICO 2 – OFERTA DE ENERGIA INTERNA EM 2002 NO BRASIL



FONTE: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

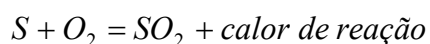
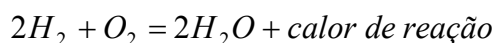
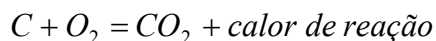


GRÁFICO 3 – OFERTA DE ENERGIA NO MUNDO EM 2002



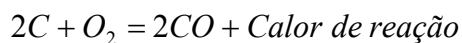
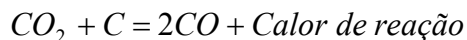
FONTE: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Combustíveis orgânicos queimados em instalações térmicas na indústria geram vários produtos de combustão. Na prática nas instalações térmicas industriais a combustão de um combustível pode ser completa ou incompleta. Geralmente, quando na câmara de combustão existe o oxigênio do ar na quantidade suficiente para a oxidação completa de todos os elementos combustíveis do combustível ocorre a combustão completa. Neste caso, no processo de combustão na câmara de combustão, os elementos químicos combustíveis do combustível (carbono C; hidrogênio H; enxofre S) reagem com o oxigênio do ar formando os produtos de combustão completa segundo as reações químicas escritas abaixo em moles:



Geralmente o ar é fornecido na câmara de combustão em quantidade maior que a estequiométrica. Sob excesso do ar na câmara de combustão, os produtos de combustão irão conter oxigênio ( $O_2$ ). Em produtos de combustão tem-se nitrogênio ( $N_2$ ) como parte integrante do ar. O nitrogênio até certos limites é considerado um gás

inerte. Se tiver na câmara de combustão uma quantidade menor de ar que a necessária, a combustão será dita incompleta. Considera-se que o hidrogênio e o enxofre são elementos mais ativos que o carbono. A falta do ar influi sobre a reação da queima do carbono e nos produtos de combustão aparece o monóxido de carbono (CO) seguindo às reações:



A formação dos produtos de combustão e a quantidade do calor liberado na câmara de combustão dependem da quantidade do ar disponível na câmara de combustão. A quantidade mínima do ar necessária para a combustão completa de um kg do combustível líquido ou sólido ou um metro cúbico do combustível gasoso chama-se o ar teoricamente necessário (ar estequiométrico) e designa-se por:  $V_{ar}^0$  ( $m^3 / kg$  ou  $m^3 / m^3$  ou ainda  $kg / kg$ ).

Para queimar bem o combustível e para garantir uma combustão completa, é necessário fornecer na câmara de combustão uma quantidade de ar maior que a teoricamente necessária. Isto porque, caso tiver na câmara somente o ar teórico, sempre haverá um local em volume da câmara de combustão com ar em excesso e um com a falta de ar, o que irá provocar a queima incompleta nesse local. Se tiver na câmara grande excesso de ar, teremos combustão completa, mas esta grande quantidade de ar em excesso diminuirá a temperatura na câmara de combustão e aumentará a quantidade de gases de escape. Tudo isso diminui o rendimento da instalação térmica. O excesso de ar é caracterizado pelo seu coeficiente e é calculado pela fórmula:

$$\gamma = \frac{V_{ar}}{V_{ar}^0} \quad (2)$$

Onde  $V_{ar}$  é o volume real do ar na câmara de combustão em  $m^3/kg$  ou  $m^3/m^3$  ou ainda  $kg/kg$ . Vários autores pela sua experiência no funcionamento de estufas e fornos apresentam que o valor ótimo de  $\alpha$  depende de vários fatores, entre eles: tipo do combustível, projeto da fornalha, maneira de queimar o combustível, construção do combustor, entre outros. Segue uma tabela dos valores do coeficiente em função do combustível usado:

TABELA 7 – VALORES ÓTIMOS DE COEFICIENTE DE EXCESSO DO AR NA FORNALHA PARA VÁRIOS COMBUSTÍVEIS

Combustível e tipo de fornalha		$\gamma$
<b>Combustível sólido</b>		
Carvão em pó	Antracite	1,25
	Betuminoso	1,2
Carvão na grelha	Mecanizada	1,6 - 1,3
	Imóvel	1,7 - 1,6
Turfa		1,4
Lenha		1,4
Cavaco		1,3
Serragem		1,2 - 1,3
<b>Combustível líquido</b>		
Diesel		1,05
Óleo combustível		1,1
<b>Combustível gasoso</b>		
Gás liquefeito de petróleo		1,05 - 1,1
Gás natural		1,05 - 1,1

FONTE: VLASSOV, DMITRI ; COMBUSTÍVEIS, COMBUSTÃO E CÂMARAS DE COMBUSTÃO.

Para fazer uma avaliação de emissões, foi feito cálculo de composição de produtos de combustão. Como acima, no caso da combustão completa com excesso de ar ( $\gamma > 1$ ), a composição dos produtos de combustão será a seguinte: CO<sub>2</sub>; SO<sub>2</sub>; H<sub>2</sub>O; N<sub>2</sub>; O<sub>2</sub>. A parte volumétrica de um componente dos produtos de combustão é calculada pela fórmula:

$$r_j = \frac{V_j}{V_g} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:  $r_i$  parte volumétrica de j-jésimo componente (%);

$V_j$  volume de j-jésimo componente dos produtos de combustão ( $\text{m}^3/\text{kg}$  ou  $\text{m}^3/\text{m}^3$ );

$V_g$  volume dos produtos de combustão ( $\text{m}^3/\text{kg}$  ou  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ).

O resultado dos cálculos de composições de produtos de combustão de vários combustíveis é apresentado na tabela 8 a seguir, conforme o volume de cada componente. Como mostra a tabela o gás natural é o combustível que menos emite  $\text{CO}_2$  na atmosfera após a combustão.

TABELA 8 – PORCENTAGEM VOLUMÉTRICA DE PRODUTOS DE COMBUSTÃO DE COMBUSTÍVEIS

Combustível	Porcentagem volumétrica, %				
	$\text{CO}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$
Diesel	13,2	0,1	11,4	74,5	0,9
Lenha (30% umidade)	12,2	0	16,5	66,4	5
Carvão vegetal	16,2	0	2,33	77,4	4,1
GLP	11,5	0	14,7	73,2	0,6
Gás Natural (Boliviano)	9,42	0	18,1	71,9	0,6

FONTE: VLASSOV, VARGAS, AZEVEDO & CARZINO; ANÁLISE TÉCNICA-ECONÔMICA E ECOLÓGICA DE ENERGÉTICOS.

## 6 ANÁLISE TÉRMICA DO FORNO

### 6.1 BALANÇO TÉRMICO

O balanço térmico ou energético do forno é verificado através de todas as formas de energia que entram no forno e toda energia perdida ou gasta durante o processo de cozimento. Dentre elas foram eleitas as mais importantes ou mais significativas para o cálculo. A equação do balanço conforme *Vlassov (2001)* é:

$$Q_f + Q_1^i + Q_{sp}^i + Q_{exo} = Q_1^e + Q_2 + Q_5 + Q_{sp}^e + Q_{end} \quad (4)$$

Onde  $Q_f$  é o calor fornecido pela mistura combustível.  $Q_1^i$  é o calor da massa do pão que entra no forno antes do cozimento.  $Q_{sp}^i$  são os calores suplementares fornecidos ao forno.  $Q_{exo}$  é o calor fornecido pelas reações exotérmicas que ocorrem durante o processo de cozimento.  $Q_1^e$  é o calor do pão depois de assado.  $Q_2$  é o calor perdido pelos gases de escape.  $Q_5$  é o calor perdido para o ambiente.  $Q_{sp}^e$  são os calores suplementares retirados do forno.  $Q_{end}$  é o calor perdido pelas reações endotérmicas que ocorrem durante o cozimento.

Não foram considerados para este cálculo os calores devido à combustão incompleta pois o excesso de ar no combustor é o mínimo suficiente para garantir uma queima completa dos gases. O calor fornecido pela mistura combustível é dado por:

$$Q_f = B(PCI + q_f + q_{ac})\tau \quad (5)$$

O consumo de combustível  $B$  de fornos industriais a gás depende do tamanho do forno e do modelo de combustor utilizado e varia de 2 a 4 Nm<sup>3</sup>/h. Utilizando-se o combustível gás natural com um poder calorífico inferior  $PCI$  igual a 37515 kJ/Nm<sup>3</sup> (dado da *Compagás*). O intervalo de tempo é designado por  $\tau$  e pode variar o conforme o tempo de cozimento. O calor físico  $q_f$  do combustível é:

$$q_f = c_f t_f \quad (6)$$

O calor específico  $c_f$ , de um combustível gasoso pode ser determinado através de sua composição química. O combustível pode ser pré-aquecido ou não e sua temperatura é designada por  $t_f$ , onde a temperatura de referência  $T_{ref}$  é 273K ou 0°C.

E o calor físico do ar da mistura combustível é,

$$q_{ac} = V_{ac} c_{pvac} t_{ac} \quad (7)$$

Onde  $V_{ac}$  é a quantidade de ar necessário para a combustão completa do gás natural,  $c_{pvac}$  é o calor específico do ar da combustão à pressão constante e à uma temperatura  $t_{ac}$ , o ar para combustão também pode ser pré-aquecido ou não.

O calor  $Q_1$  é o calor útil para o cozimento, e será a finalidade deste balanço, na realidade significa o calor da massa do pão antes do cozimento e depois ao fim do processo e é dado pela fórmula:

$$Q_1 = Q_1^i - Q_1^e \quad (8)$$

Podemos assumir que o calor da massa antes do cozimento  $Q_1^i$  é igual a:

$$Q_1^i = n_b m_b c_b t^i \quad (9)$$

Onde:  $n_b$  é o número de pães a ser produzido por hora,  $m_b$  é a massa em kg de cada pão,  $c_b$  é o calor específico do pão igual a 3,1 kJ/kg conforme *Matz* e  $t^i$  é a temperatura no início do cozimento que é igual a 37°C.

O calor das reações exotérmicas  $Q_{exo}$  é formado principalmente pelo calor cedido ao pão pela fermentação anaeróbica  $Q_{fer}$  dos açúcares presentes na massa que é igual a 226 kJ/kg (ver tópico 3.1.2). A concentração de açúcares  $n_{su}$  na massa segundo *Matz* não deve ultrapassar seis por cento do total de ingredientes. Sendo assim pode ser definido como:

$$Q_{exo} = n_b m_b Q_{fer} n_{su} \quad (10)$$

As reações endotérmicas que ocorrem no pão são principalmente a gelatinização do amido  $Q_{end\ am}$  e a evaporação do álcool  $Q_{end\ alc}$  resultante do processo de fermentação, sendo que para cada mol de açúcar fermentado são gerados dois mols de álcool e dois de dióxido de carbono, isto é, metade (0,5) torna-se álcool e metade torna-se dióxido de carbono. A entalpia de vaporização do álcool  $E_{alc}$  é igual a 854 kJ/kg, logo:

$$Q_{end\ alc} = n_b m_b E_{alc} n_{su} \cdot 0,5 \quad (11)$$

O processo de gelatinização somente ocorre em temperaturas acima da temperatura ambiente na qual é necessária para o amido absorvê-la. A entalpia de gelatinização do amido de milho  $E_{am}$  é de 2,92 kJ/kg e do amido do trigo  $E_{at}$  é de 10,04 kJ/kg, dados de *Rahman (1995)*. A quantidade de amido de milho  $n_{am}$  na massa é de um por cento e a quantidade de trigo na massa é de sessenta por cento porém apenas vinte e cinco por cento disto é amido de trigo, logo  $n_{at} = 0,15$ , então temos:

$$Q_{end\ gel} = n_b m_b (E_{am} \cdot n_{am} + E_{at} n_{at}) \quad (12)$$

Logo o calor das reações endotérmicas é:

$$Q_{end} = Q_{end\ gel} + Q_{end\ alc} \quad (13)$$

Os calores suplementares  $Q_{sp}$  neste caso são o calor da bandeja, o calor para aquecer o ar câmara de cozimento e o calor fornecido pelo ventilador de circulação de ar dentro da câmara. Onde o calor suplementar fornecido no início do cozimento é  $Q_{sp}^i$  e o calor retirado no fim do cozimento são as perdas suplementares  $Q_{sp}^e$ . O número de bandejas por forno é  $n_t$ , a massa de cada bandeja  $m_t$  é de 0,35 kg e é feita de chapa fina de alumínio perfurado, cujo calor específico  $c_{at}$  é 0,875 kJ/kg K, a temperatura

inicial da bandeja  $t^i$  é de 37°C que é a mesma temperatura do pão ao sair da câmara de fermentação e ser colocada ao forno, no fim do cozimento a temperatura  $t^e$  é aproximadamente 260°C. A massa de ar  $m_{ar}$  é o volume de ar da câmara convertido em kg, e o calor específico do ar à 300K é  $c_{p ar}$ . A potência do ventilador é  $N_v$ .

$$Q_{sp} = Q_{sp}^i - Q_{sp}^e = (n_t m_t c_{Al} t^i + m_{ar} c_{p ar} t^i + N_v \tau) - (n_t m_t c_{Al} t^e + m_{ar} c_{p ar} t^e) \quad (14)$$

A quantidade de gases emitidos na combustão está intimamente ligada ao consumo de combustível. Logo o valor do calor perdido pelos gases na exaustão,  $Q_2$  pode ser obtido através da expressão abaixo:

$$Q_2 = (B V_g c_{pv g} t_g) \tau - B \gamma W_{ac} c_{pv ac} t_{ac} \tau \quad (15)$$

onde, o volume dos gases no escape  $V_g$  pode ser obtido através do cálculo da combustão estequiométrica do gás natural, baseado na composição química do mesmo, assim como também pode ser obtido o calor específico dos gases de escape  $c_{pv g}$ . A temperatura dos gases no escape  $t_g$  é determinada pelo processo de aquecimento no forno e é aproximadamente 300°C. O excesso do ar  $\gamma$  recomendado para fornos que trabalham com gás natural é 1,05 (ver tabela 7).

O calor perdido para o ambiente  $Q_5$  é determinado pela expressão abaixo:

$$Q_5 = Q_{con} + Q_{rad} + Q_{vap} \quad (16)$$

Para  $Q_{con}$  foi considerado a perda de calor por convecção natural pelas paredes laterais, superior, fundo e pela porta. Primeiramente calculando o número de Rayleigh para cada face e depois calculando o número de Nusselt específico para cada uma, e a partir das constantes adimensionais calculadas foi calculado o coeficiente de perda de calor para o ambiente. O número de Rayleigh para as faces laterais do forno é:



$$Ra_H = \frac{g \beta (t_{cv} - t_{\infty}) H^3}{\alpha \nu} \quad (17)$$

Onde  $g$  é a aceleração da gravidade local,  $\beta$  é o coeficiente de expansão volumétrico do ar,  $\alpha$  é a difusidade térmica do ar,  $\nu$  é a viscosidade cinemática do ar,  $H$  é a altura do forno,  $t_{cv}$  é a temperatura do revestimento externo do forno, isto é a temperatura da face do forno,  $t_{\infty}$  é a temperatura ambiente. Do mesmo jeito podemos calcular o número de Rayleigh para a face superior.

$$Ra_L = \frac{g \beta (t_{cv} - t_{\infty}) L^3}{\alpha \nu} \quad (18)$$

TABELA 9 – DADOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO:

Aceleração da gravidade $g$	9,8	m/s
Temperatura Ambiente $t_{\infty}$	20	°C
Temperatura dentro da Câmara $t_{ch}$	200	°C
Temperatura da face do forno $t_{cv}$	50	°C
Coeficiente Expansão Térmica $\beta$	0,002	1/K
Difusidade Térmica $\alpha$	5,67E-05	m <sup>2</sup> /s
Viscosidade Cinemática $\nu$	3,88E-05	m <sup>2</sup> /s
Condutividade Térmica do ar $k_{ar}$	4,07E-02	W/m K

FONTE: INCROPERA, F. P. ; DE WITT, D. P. FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA, 1994 EDITORA LTC.

Com o valor do número de Rayleigh podemos determinar o número de Nusselt específico para cada face. O número de Nusselt para as faces laterais  $Nu_H$  é:

$$Nu_H = \left\{ 0,825 + \frac{0,387(Ra_H)^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (19)$$

Onde  $Pr$  é o número de Prandtl para o ar. O número de Nusselt para a face superior  $Nu_L$  é:

$$Nu_L = 0,15(Ra_L)^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

Então podemos calcular o coeficiente de transferência de calor lateral  $h_{lat}$  :

$$h_{lat} = \frac{Nu_H k_a}{H} \quad (21)$$

E o coeficiente de transferência de calor pelo teto  $h_{roo}$ , onde  $k_a$  é a condutividade térmica do ar.

$$h_{roo} = \frac{Nu_L k_a}{L} \quad (22)$$

O calor transferido pela porta e pela face do fundo do forno é igual a:

$$Q_{doo} = Q_{bot} = h_{lat}(WH)(t_{cv} - t_{\infty}) \quad (23)$$

O calor transferido pelas laterais do forno é igual a:

$$Q_{lat} = h_{lat}(LH)(t_{cv} - t_{\infty}) \quad (24)$$

O calor transferido pelo teto do forno ao ambiente é:

$$Q_{roo} = h_{roo}(LW)(t_{cv} - t_{\infty}) \quad (25)$$

Logo o calor total perdido para o ambiente por convecção é:

$$Q_{con} = Q_{doo} + Q_{bot} + (Q_{lat} \cdot 2) + Q_{roo} \quad (26)$$

Para calcular o calor perdido por radiação para o ambiente foram consideradas as perdas pelas paredes do forno, pelo teto, pelo lastro e pela porta. O calor perdido por radiação pela porta foi calculado da seguinte maneira:

$$Q_{doo_{ss}} = \varepsilon_{ss} F_{doo} \sigma (HW - H_{gl}W_{gl})(T_{cv}^4 - T_{\infty}^4) \quad (27)$$

Onde:  $\varepsilon_{ss}$  é a emissividade do aço inox,  $F_{doo}$  é o fator de visibilidade da porta em relação ao ambiente e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $H_{gl}$  é a altura do vidro e  $W_{gl}$  largura do vidro, isto é a emissão de radiação pela face de revestimento de aço inox da porta.

$$Q_{doo_{gl}} = \varepsilon_{gl} F_{doo} \sigma (H_{gl}W_{gl})(T_{ch}^4 - T_{\infty}^4) \quad (28)$$

Onde  $\varepsilon_{gl}$  é a emissividade através do vidro da porta, e esta é a parcela de radiação da câmara que atravessa o vidro e é perdida para o ambiente.

E a perda de calor pelas faces laterais é igual a:

$$Q_{lat+bot+roo+bal} = \varepsilon_{ss} F_{lat+bot+roo+bal} \sigma (2 \cdot HW + HL + 2 \cdot LW)(T_{cv}^4 - T_{\infty}^4) \quad (28)$$

Onde  $F_{lat+bot+roo+bal}$  é o fator de visibilidade do forno em relação ao ambiente. Logo o calor perdido por radiação para o ambiente é:

$$Q_{rad} = Q_{doo_{ss}} + Q_{doo_{gl}} + Q_{lat+bot+roo+bal} \quad (29)$$

TABELA 10 – DADOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO:

Emissividade através do vidro $\varepsilon_{gl}$	1
Emissividade do aço inox $\varepsilon_{ss}$	0,4

FONTE: INCROPERA, F. P. ; DE WITT, D. P. FUND.AMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA, 1994 EDITORA LTC.

Durante o cozimento é necessário injetar vapor na câmara a fim de melhorar as características de cozimento do pão, portanto o calor perdido para aquecer a água de vaporização usada para cozer o pão foi considerado.

$$Q_{st} = m_w c_{p_w} (t_{eb} - t^i) + m_w C_{st} + m_w c_{p_{st}} (t^e - t_{eb}) \quad (30)$$

Onde  $m_w$  é a massa de água a ser vaporizada,  $c_{pw}$  é o calor específico da água à 20°C,  $t_{eb}$  é a temperatura de ebulição da água,  $C_{st}$  é calor latente de vaporização da água e  $c_{pst}$  é o calor específico do vapor à 260°C.

TABELA 11 – DADOS DA ÁGUA DE VAPORIZAÇÃO:

Calor específico da água à 20°C $c_{pw}$	4,186	kJ/kg K
Calor específico da água à 260°C $c_{pst}$	4,48	kJ/kg K
Calor latente de vaporização da água $C_{st}$	2260	kJ/kg
Massa da água vaporizada na câmara $m_w$	0,5	kg

FONTE: INCROPERA, F. P. ; DE WITT, D. P. FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA, 1994 EDITORA LTC.

Desta forma através do balanço podemos determinar  $Q_1$  o calor útil ao cozimento e portanto pode-se admitir que através da lei de Newton do resfriamento temos um coeficiente total de transferência de calor ao pão durante o cozimento chamado  $h_{tot}$ .

$$Q_1 = h_{tot} n_b A_s (T_s - T_{ch}) \quad (31)$$

Onde  $A_s$  é a área superficial do pão, supondo que o pão é um cilindro,  $t_s$  é a temperatura superficial do pão e  $t_{ch}$  é a temperatura da câmara. O coeficiente de transferência de calor total do forno ao pão  $h_{tot}$  é composto de uma parcela transferida pelo forno por convecção e uma parcela transferida pelo forno por radiação, conforme abaixo:

$$h_{tot} = h_{con} + h_{rad} \quad (32)$$

Se for feito o seguinte cálculo pode-se determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção do forno, isto é o coeficiente total menos a parte transferida por radiação, logo:

$$h_{con} = h_{tot} - F_b \varepsilon_b \sigma (T_s - T_{ch})(T_s^2 - T_{ch}^2) \quad (33)$$

Onde  $F_b$  é o fator de visibilidade do pão em relação a câmara. Como a temperatura da superfície do pão varia durante o cozimento a parcela transferida por radiação ao pão varia também, a emissividade do pão foi considerada 0,9 conforme *Earle (1983)*. O coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser calculado por correlações baseadas na velocidade do ar, suas propriedades físicas, a temperatura do pão e sua forma. Também podemos determinar através do coeficiente de transferência de calor por convecção o número de Nusselt característico para esta câmara de cozimento. Isto é:

$$Nu_D = \frac{h_{con} D_b}{k_a} \quad (34)$$

## 7 ANÁLISE TÉRMICA DE UM FORNO INSTALADO

### 7.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO FORNO

Em todos os países do mundo, as técnicas de panificação e equipamentos evoluíram consideravelmente nos últimos anos, com introdução de sistemas mais precisos que permitem a produção de grande quantidade com boa qualidade. Entretanto existem empresas trabalhando ainda com técnicas e processos rudimentares, e com grande dificuldade para adaptar-se a esta nova realidade.

Muitas variáveis do equipamento influenciam na qualidade final do produto, sendo a mais importante delas a temperatura. A temperatura do forno utilizado tem grande influência no aspecto, volume e perdas durante o cozimento, razão pela qual deve ser precisamente controlada.

Temos que:

- 1 Um forno de temperatura excessivamente quente dará ao pão uma pestana irregular e mal disposta, além de pouco desenvolvimento, com casca corada e queimada nas pontas;
- 2 Um forno de temperatura branda acarretará ao pão uma pestana dilacerada em produto achatado, branco e seco.

É possível através do controle de temperatura de cocção do produto, corrigirmos a qualidade do trigo utilizado, observando que para trigos *'fracos'* a temperatura deve ser maior que o normal, e que para trigos *'fortes'* é recomendável utilizar-se temperatura um pouco abaixo do normal.

O peso e o tipo do produto determinam o tempo de cozimento do produto, além de outros períodos que influem no volume de produção, como: amassamento, descanso da massa, cilindragem, divisão, boleamento, modelagem e fermentação. Esta

última de importância capital para sua qualidade.

O forno modelo Turbo Haas (ver figura 16) é utilizado para produção de pães, tortas, bolos e doces, pois distribui bem o calor entre as bandejas. Construído em aço inox, possui vaporização, controles eletrônicos digitais de temperatura e tempo de cozimento, além de armário suporte de bandejas.

FIGURA 16 – FOTO DO FORNO DE CONVECÇÃO



FONTE:HAAS DO BRASIL

O princípio do cozimento do equipamento é através de radiação mais convecção forçada através da recirculação dos gases na câmara. A câmara de cozimento é construída em aço inoxidável completamente soldada estanque, possui dois ventiladores que circulam o ar quente do cozimento. Desta forma, obtém-se um cozimento rápido e por igual decorrente da excelente troca de calor entre o ar quente

circulante na câmara e o produto a ser cozido. Possui uma porta feita de aço inox com isolamento térmico e com vidro duplo (ver figura 21) para evitar perda de calor por ela.

A câmara de cozimento (ver figura 17) possui sistema de distribuição do fluxo de ar que suporta as assadeiras onde ficam os produtos durante o cozimento, com divisões para nove assadeiras. Este sistema é removível para possibilitar a manutenção dos ventiladores e do sistema de entrada de água para a vaporização. Este sistema de porta assadeiras é construído com chapa perfurada com 40% de área aberta, permitindo uma distribuição de calor em toda a câmara de modo a obter um produto com características de cozimento homogêneas.

FIGURA 17 – FOTO FORNO DE CONVECÇÃO – CAMARA DE COZIMENTO



FONTE – HAAS DO BRASIL

A circulação de ar quente no interior é feita através de fluxo e contra-fluxo



gerado por dois ventiladores, os quais inicialmente giram no sentido horário e durante o processo de cozimento sofrem uma inversão de rotação.

Na parte traseira superior está instalada a válvula de alívio da câmara de cozimento para exaustão do vapor (ver figura 18), acionada através de uma manopla localizada na parte frontal do forno, acima do painel de comando.

FIGURA 18 – FOTO FORNO DE CONVECÇÃO – TRASEIRA DO FORNO



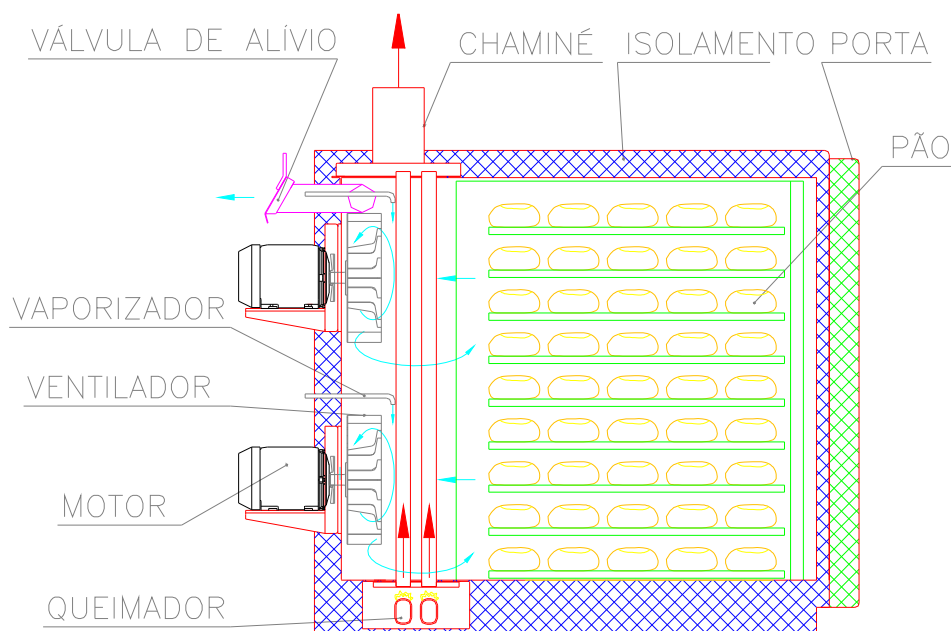
FONTE – HAAS DO BRASIL

No caso de acúmulo de gases no interior da câmara de cozimento, a pressão interna pode exceder o limite no qual a válvula de alívio abre-se automaticamente. Pois a pressão de vapor é maior que o seu peso sobre o tubo de saída, deixando o vapor sair regulando automaticamente a pressão da câmara. Por medida de segurança, a válvula de exaustão deve estar sempre aberta, pois o produto cozido pode emanar

gases combustíveis. Após o cozimento, a temperatura interna da câmara de cozimento cai entre 10 e 30° C, recuperando-se em seguida atingindo a temperatura regulada até o início do novo processo.

Entre a câmara de cozimento e o revestimento há uma camada de isolamento térmico que evita perdas de calor (ver figura 19). O revestimento total do forno, incluindo a porta, é executado em aço inox, permitindo manter o equipamento limpo e livre de arranhões, e que reduz a troca de calor por radiação. O painel elétrico e o painel de comando ficam na parte frontal direita do forno e agrupam todas as funções de comando do forno. O painel de comando controla o acionamento, cozimento, a temperatura e a vaporização. O armário de fermentação e o suporte para assadeiras são montados na parte inferior do forno.

FIGURA 19 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO FORNO DE CONVECÇÃO



FONTE: HAAS

Uma iluminação interna incandescente, que permite uma melhor visualização do processo, está localizada na lateral direita superior da câmara e é protegida por um vidro temperado. O acionamento da lâmpada está no controlador

frontal, situado no painel de comando.

O sistema de vaporização fica montado na parte traseira do forno. Uma mangueira de 1/2" deve ser conectada com água potável na pressão entre 0,7 e 1,5 bar. Para obter vapor, é necessário atingir a temperatura "*set-point*". Quando o forno estiver com a temperatura desejada basta apertar o botão correspondente "Liga com Vapor" no painel de comando. Este botão aciona uma válvula solenóide que libera água para dutos de vaporização de encontro aos rotores dos ventiladores, gerando o vapor pelo contato direto com as partes quentes, com o movimento dos ventiladores o vapor é circulado em direção ao produto.

O tempo de acionamento da válvula é comandado por um temporizador eletrônico regulável, situado no painel de comando, isto é, o tempo de vaporização é comandado e regulado pelo painel de operação.

O forno possui uma gaveta inferior, onde ficam os componentes do aquecimento. A conexão de entrada de gás tem rosca de 1/2" e fica na traseira inferior do forno. A pressão de entrada de gás deve ser de no mínimo 20mbar e no máximo 35mbar, a válvula de esfera fica na parte frontal inferior do forno e bloqueia a passagem do gás.

Em seguida o sistema possui um filtro de gás e uma válvula solenóide de bloqueio e segurança que liberam o gás para os dois combustores tubulares (ver figura 20), eles trabalham com ar atmosférico e tem uma construção especial que tem baixos níveis de emissão de CO e NOx, sendo que cada um tem uma capacidade calorífica de 15.000 kcal/h, portanto o conjunto é capaz de produzir 30.000 kcal/h.

O sistema possui dois eletrodos um de ignição e o outro de ionização, que acendem e monitoram a presença de chama, caso a chama se apague o fornecimento de gás é interrompido pela válvula solenóide por segurança.

O calor gerado pelos combustores é dirigido para os tubos trocadores de

calor que atravessam o forno de baixo para cima e distribuem calor por radiação para dentro do forno, os ventiladores, fazem com que o ar circule entre os trocadores e transfira o calor para a câmara uniformemente. Os gases da combustão não entram em contato com a câmara de cozimento e são dirigidos para a chaminé do forno situada acima dos tubos trocadores de calor. Existem vários tipos de assadeiras, cada uma para um tipo diferente de produto.

FIGURA 20 – FOTO FORNO DE CONVECÇÃO – COMBUSTOR



FONTE – HAAS DO BRASIL

O forno vem equipado com um dos mais modernos e fáceis instrumentos de operar disponíveis no mercado para controle de temperatura, tempo de vaporização e tempo de cozimento.

Todos os parâmetros de controle são pré-ajustados de fábrica. O operador do forno tem acesso à seleção de temperatura de cozimento desejada ao tempo de

vaporização e ao tempo de cozimento evitando desta forma alterações involuntárias de parâmetros.

FIGURA 21 – FOTO FORNO DE CONVECÇÃO – PORTA COM VIDRO DUPLO



FONTE – HAAS DO BRASIL

Ao ligar o forno o valor de temperatura interna da câmara de cozimento é visualizado no display de controle de temperatura, pois há sensores de temperatura dentro da câmara.

O Início da operação se dá no momento em que o forno chegar à temperatura desejada. De preferência, o forno deve permanecer cerca de 15 minutos nessa temperatura antes do início do cozimento. Abrindo a porta desliga o forno automaticamente, para que sejam introduzidas as assadeiras.

Deve-se depois fechar a porta, pressionar o botão (*liga s/ vapor*) para produtos que não requerem vapor ou o botão (*liga c/ vapor*) para produtos a serem

vaporizados (ex. pão francês). Decorrido o tempo de cozimento selecionado, o forno é automaticamente desligado, um alarme sonoro é acionado indicando o fim de cozimento.

Deve-se acionar a válvula de alívio de exaustão, aguardar alguns segundos até que uma parte dos vapores gerados no cozimento seja exaurida da câmara, em seguida pode-se abrir a porta e retirar as assadeiras.

Após a retirada das assadeiras, fechar a porta e empurrar a manopla, fechando novamente a válvula de exaustão. O forno encontra-se pronto para nova operação de cozimento.

## 7.2 CÁLCULO DO BALANÇO TÉRMICO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Através da rotina de cálculo do balanço térmico foi feito um programa em linguagem Fortran para determinação do coeficiente de transferência de calor ao pão. O programa foi abastecido de informações através da experiência com fornos e de medidas dimensionais e testes de um forno de convecção da empresa Haas do Brasil. As temperaturas das reações foram baseadas nos valores do gráfico 1.

Segue abaixo a tabela 12 com os valores do cálculo do programa:

TABELA 12 – VALORES DO BALANÇO TÉRMICO

<b>Identificadores do programa</b>	<b>Denominação</b>	<b>Valores</b>	<b>unidade</b>
As	Área superficial do pão	0,02459	m <sup>3</sup>
B	Consumo de combustível	0,00065	Nm <sup>3</sup> /s
cf	Calor específico do combustível	1,655	kJ/m <sup>3</sup> K
cpb	Calor específico do pão	3,1	J/kg K
cpg	Calor específico dos gases de combustão	1,539	kJ/m <sup>3</sup> K
cpvap	Calor específico do vapor d'água	0,4902	J/kg K
Db	Diâmetro médio do pão	0,054	m
epsilonb	Emissividade do pão	0,9	

Fb	Fator de visibilidade do pão na câmara	1	
Fi	Fator de visibilidade do forno no ambiente	1	
Gama	Excesso do ar na mistura combustível	1,05	
H	Altura do forno	0,94	m
hcon	Coeficiente de transferência de calor por convecção	23,02	W/m <sup>2</sup> K
hfgH2O	Calor latente de vaporização d'água	2,26E+06	J/kg
hmH	Coeficiente de transferência de calor por convecção pela lateral	4,231	W/m <sup>2</sup> K
hmL	Coeficiente de transferência de calor por convecção pelo teto	5,232	W/m <sup>2</sup> K
hrad	Coeficiente de transferência de calor por radiação	3,145	W/m <sup>2</sup> K
htot	Coeficiente de transferência de calor total	26,16	W/m <sup>2</sup> K
idesp	Entalpia de gases despreendidos durante o cozimento	0	kJ/m <sup>3</sup>
L	Comprimento do forno	0,707	m
Lb	Comprimento médio do pão	0,118	m
m'ar	Massa de ar	0,4123	kg
mb	Massa do pão	0,06	kg
mH2O	Massa de água para vaporização	1	kg
mt	Massa da bandeja	0,35	kg
na	Numero de assadeiras	9	
nb	Número de pães assados por hora	540	
Nud	Número de Nusselt em relação ao diâmetro do pão	31,98	
NuH	Número de Nusselt em relação à lateral do forno	142	
NuL	Número de Nusselt em relação ao teto	132,1	
P	Potência do ventilador de circulação de gases	0,368	kW
PCI	Poder calorífico inferior	3,75E+04	kJ/Nm <sup>3</sup>
Q1	Calor útil do pão	9,73E+04	kJ
Q'1	Calor do pão que entra	3,11E+04	kJ
Q"1	Calor do pão que sai	1,28E+05	kJ
Q2	Calor perdido devido aos gases de escape	2,00E+04	kJ

Q5	Calor perdido para o ambiente	3379	kJ
Q5con	Calor perdido por convecção	361	kJ
Q5doo	Calor perdido por convecção pela porta	65,63	kJ
Q5lat	Calor perdido por convecção pela lateral	84,36	kJ
Q5rad	Calor perdido por radiação	423,6	kJ
Q5rf	Calor perdido por radiação pelo fundo	92,7	kJ
Q5rl	Calor perdido por radiação pela lateral	72,12	kJ
Q5roo	Calor perdido por convecção pelo teto	61,03	kJ
Q5rp	Calor perdido por radiação pela porta	132,4	kJ
Q5rs	Calor perdido por radiação pela face superior	54,24	kJ
Q5vap	Calor perdido pela água de vaporização	2595	kJ
qac	Calor do ar da combustão	3085	kJ
Qend	Calor das reações endotérmicas	411,9	kJ
Qexo	Calor das reações exotérmicas	439,3	kJ
Qf	Calor cedido pelo combustível	1,20E+05	kJ
qf	Calor do combustível	484,9	kJ/Nm <sup>3</sup>
Q'sp	Calor suplementar no início	2308	kJ
Q"sp	Calor suplementar no fim	1504	kJ
Qvp_al	Calor de vaporização do álcool	215,8	kJ
RaH	Número de Rayleigh em relação a lateral	1,61E+09	
RaL	Número de Rayleigh em relação ao teto	6,83E+08	
Tac	Temperatura do ar da combustão	293	K
Tal	Tempo de cozimento	3600	s
Tamb	Temperatura ambiente	293	K
Tch	Temperatura da câmara de cozimento	533	K
Te	Temperatura no fim do cozimento	473	K
Teb	Temperatura de ebulição da água	373	K
Tf	Temperatura do combustível na entrada	293	K
Tg	Temperatura dos gases de escape	573	K
Ti	Temperatura no início do cozimento	310	K
Tr	Temperatura do revestimento externo	323	K

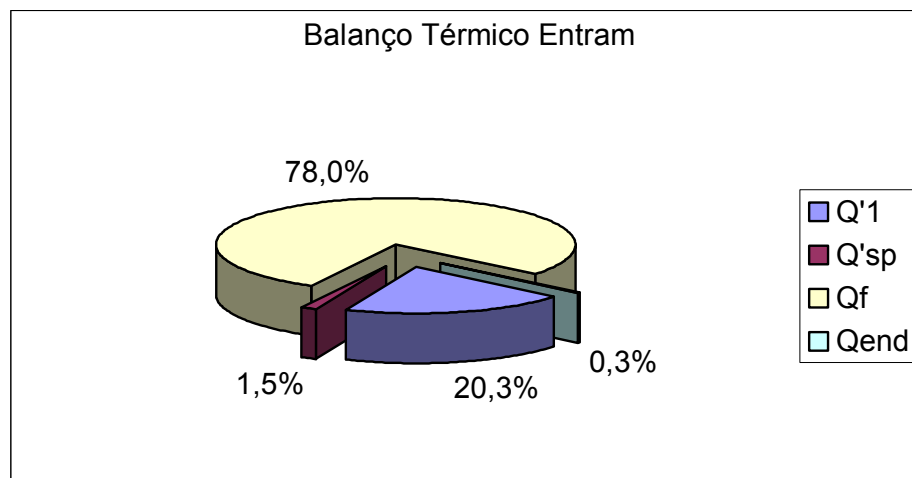


Ts	Temperatura média superficial do pão	414	K
V	Volume da câmara	0,3655	m <sup>3</sup>
Vac	Volume do ar da combustão por m <sup>3</sup> de gás	10,45	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>
Vdesp	Volume de gases desprendidos	0	m <sup>3</sup>
Vg	Volume total de gases	11,66	m <sup>3</sup>
W	Largura do forno	0,55	m

FONTE:O AUTOR

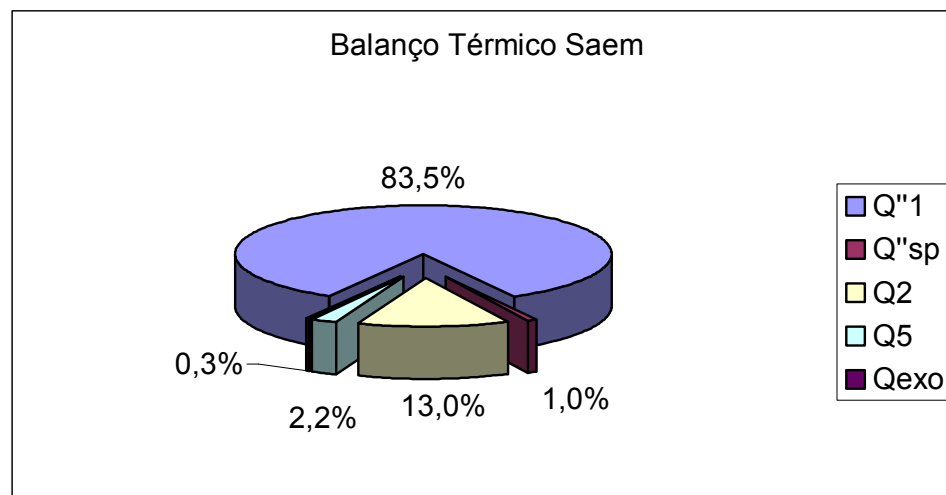
Para o balanço estar correto é necessário que o valor do calor que entra seja igual ao valor do calor que sai. Desta forma é possível determinar o coeficiente de transferencia de calor. É possível perceber que o calor cedido pelo combustível é responsável por setenta e oito por cento do total de calor. E o calor final do pão é aproximadamente 83,5% do calor total que sai do forno depois que o produtos está assado.

GRAFICO 4 – CALORES QUE ENTRAM NO FORNO



FONTE:O AUTOR

GRAFICO 5 – CALORES QUE SAEM DO FORNO



FORNTE:O AUTOR

Sempre há na tomada de medidas alguns erros e algumas incertezas de medições de aparelhos existem. Numa análise geral do cálculo, foram feitas várias simulações de cálculos com vários valores diferentes para se ter uma idéia da incerteza geral do balanço. Por exemplo, tomando por base o valor do consumo de gás, que é o dado mais importante do cálculo, tem-se um consumo médio de um forno marca Haas de  $2,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , e de um forno similar marca Polin varia entre 2 e  $2,9 \text{ Nm}^3/\text{h}$  (depende do tamanho da câmara). Fazendo esta variação de valores para o consumo encontramos um valor do coeficiente de transferência de calor total entre  $19,7 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  e  $29,5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ .

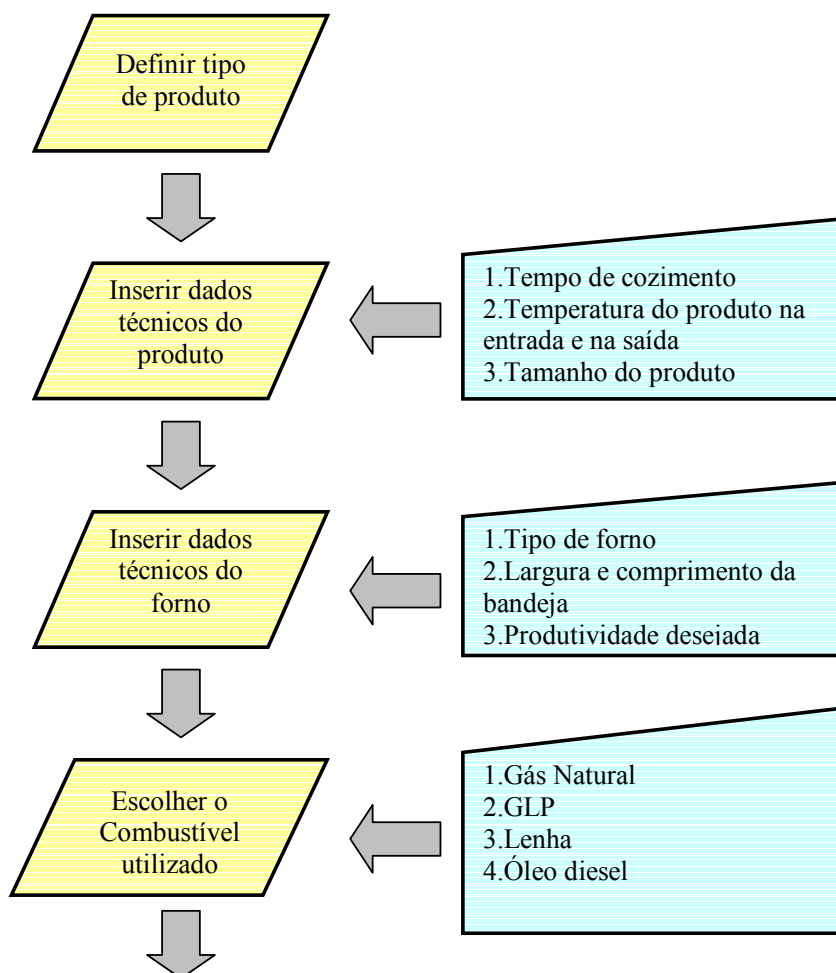
A diferença a princípio pode ser grande cerca de trinta e quatro por cento, porém devemos levar em conta que ambos os valores estão de acordo com a bibliografia pesquisada. E se afinal fizermos uma análise de escala no cálculo perceberemos que os valores que se deseja calcular no projeto automático computacional não vão sofrer uma mudança de escala.

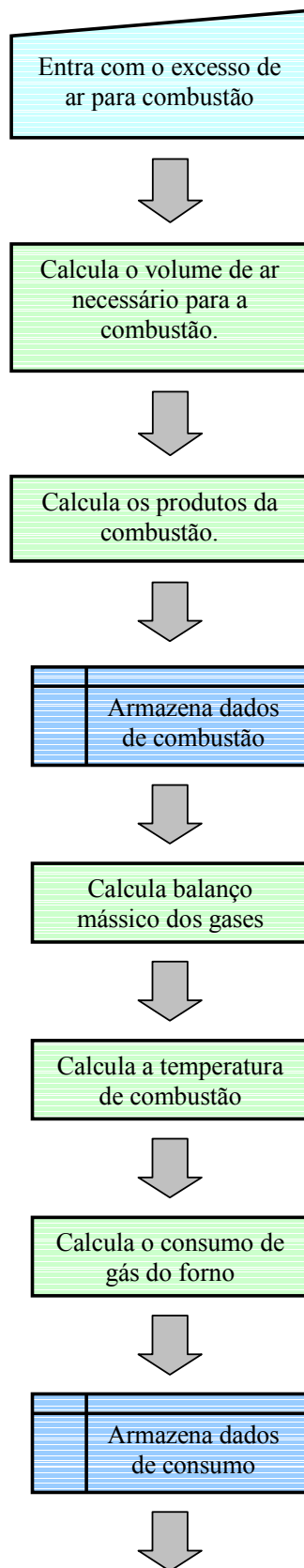
## 8 PROJETO AUTOMÁTICO PARA FORNOS

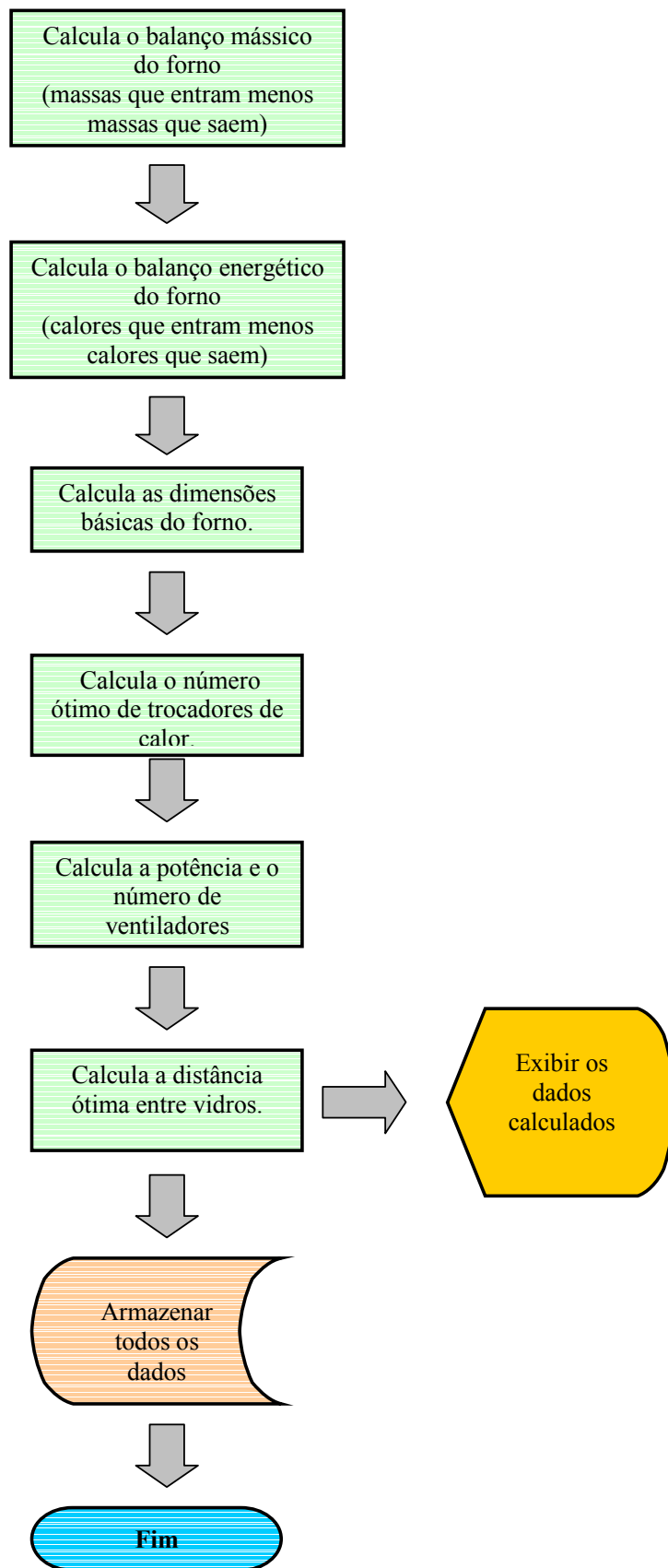
A partir do cálculo do balanço energético e do cálculo do coeficiente de transferência de calor ao pão no forno, foi desenvolvido um programa computacional em Fortran que contém uma rotina capaz de ajudar a dimensionar fornos para a e projetos especiais para indústria alimentícia.

O programa é composto por uma parte onde é definido o produto e suas características principais, depois onde é definido o combustível a ser usado o programa chama uma sub-rotina para cada combustível diferente.

### 8.1 FLUXOGRAMA DO PROJETO







## 8.2 PROJETO AUTOMÁTICO DO FORNO DE CONVECÇÃO

Para se definir o tipo de máquina que será comprada um cliente deve saber o tipo do produto que será feito. Normalmente os grandes clientes fazem testes piloto em laboratórios alimentícios para lançar um produto novo, ou então como fazem os pequenos produtores copiam ou modificam produtos já existentes. Desta forma as dimensões as medidas do produto são fundamentais para se definir o tipo do forno ou as dimensões dele. O tempo de cozimento, a temperatura no início, a temperatura no fim do cozimento e a quantidade de produtos a serem feitos por hora são fundamentais para se definir o projeto que deseja.

O programa prevê uma entrada de dados com o tipo do produto e as características principais do mesmo:

"Informe o número de pães a ser produzido por hora"

"Entre com a massa unitária do produto em kg"

"Entre com o diâmetro médio do produto em m"

"Entre com o comprimento médio do produto em m"

"Entre com as dimensões da bandeja"

Depois de definidas as características do produto, é necessário escolher o combustível a ser utilizado para o projeto do forno, dentre as opções mais usadas hoje em dia estão o gás natural, o GLP, a lenha e os fornos elétricos. O óleo é menos usado, mas ainda tem sua importância em regiões afastadas e de difícil acesso.

"ESCOLHA O COMBUSTIVEL A SER USADO"

"1.GAS NATURAL"

"2.GLP"

"3.LENHA"

"4.OLEO DIESEL"

## "5.ELETRICIDADE"

Através dos dados gerais fornecidos, do coeficiente de transferência de calor ao pão e da potência fornecida por cada combustível, a temperatura teórica de combustão, a quantidade de emissões de cada combustível podendo-se determinar qual o combustível que menos polui, isto é o mais correto ecologicamente.

O tamanho da bandeja deve ser escolhido conforme o padrão fornecido pelos fabricantes, o mais comercializado e mais comum nas padarias é 58x78cm. Em função da quantidade a ser produzida e do tamanho da bandeja determinam-se as medidas da câmara de cozimento e por consequência o volume da mesma.

A vazão do ar do ventilador  $\dot{m}_v$  é calculada como sendo a troca de um volume da câmara  $V_{ch}$  por segundo. E a velocidade do ar na câmara  $U_{ar}$  para o cozimento de pães deve ser entre 5 e 9 m/s segundo *Rahman (1995)*. Com essas premissas podemos calcular a potência do ventilador de circulação de ar dentro da câmara conforme a fórmula:

$$\dot{m}_v = 3600 \cdot V_{ch} \quad (35)$$

A pressão do ventilador é calculada conforme a fórmula abaixo:

$$p_v = \Delta p \frac{\rho_{ar}}{\rho_{ac}} \quad (36)$$

Onde  $\Delta p$  é a perda de pressão que deve garantir o ventilador,  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar e  $\rho_{ac}$  é a densidade do ar na câmara à 200°C. Logo a potência é:

$$N = \frac{\dot{m}_v p_v \kappa_{re} \kappa_{pt} \cdot 0.001}{3600 \cdot \eta} \quad (37)$$

Onde  $\kappa_{re}$  é o coeficiente de potência de reserva, e  $\kappa_{pt}$  é o coeficiente de potência de perdas de transmissão,  $\eta$  é o rendimento do ventilador.

Definida a potência do ventilador podemos calcular o diâmetro do ventilador  $D_v$ , em função da sua vazão e velocidade, a área do ventilador é dada por:

$$A_v = \frac{\dot{m}_v}{U_{ar} \cdot 3600} \quad (38)$$

$$D_v = \left( \frac{4 \cdot A_v}{\pi} \right)^{0.5} \quad (39)$$

Com o combustível a ser usado definido pode-se calcular o balanço térmico do forno levando em conta que todos os calores envolvidos no processo de cozimento. E através do balanço térmico é possível calcular o consumo de combustível, sabendo o consumo é possível determinar a potência dos combustores, conforme a fórmula:

$$N_Q = B(PCI)\tau \quad (40)$$

Muitas vezes os combustores fornecidos pelo mercado tem uma potência específica padronizada, conforme o projeto e a necessidade o número de combustores pode ser determinado por:

$$n_Q = \frac{N_Q}{N_{padrão}} \quad (41)$$

Como o volume da câmara já foi pré-determinado através das medidas ótimas entre a bandeja e o arranjo dos pães na bandeja e a quantidade de bandejas então pode ser determinada a quantidade de chapa necessária para a construção da câmara de cozimento, a cada medida foi adicionado dez por cento de retalhos, para corte, dobra e solda (ver figura 22).

$$A_{ch} = (L_{ch}W_{ch} \cdot 1,1) + (H_{ch}L_{ch} \cdot 1,1) \cdot 2 + (W_{ch}H_{ch} \cdot 1,1) \cdot 2 \quad (42)$$

Da mesma forma para as chapas de revestimento externo:

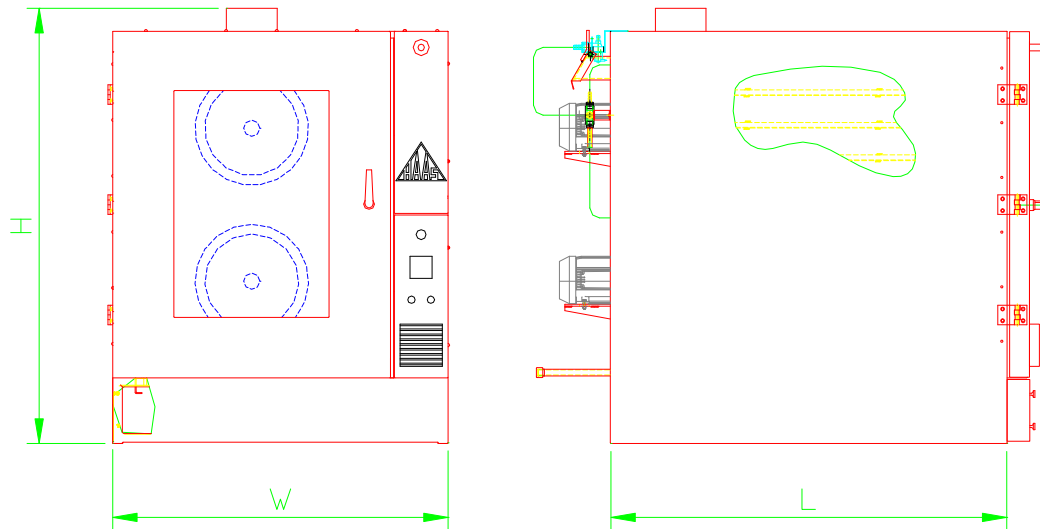


$$A_{cv} = (LW \cdot 1,1) \cdot 2 + (HL \cdot 1,1) \cdot 2 + (WH \cdot 1,1) \cdot 2 \quad (43)$$

O tamanho do vidro da porta é dado por:

$$T_{gl} = W_{ch} H_{ch} \quad (44)$$

FIGURA 22 – DESENHO DO FORNO HAAS



FONTE: HAAS DO BRASIL

A espessura mínima de isolamento  $e$  para garantir uma temperatura de aproximadamente  $50^{\circ}\text{C}$  na face do revestimento externo foi calculada levando em conta todo o calor perdido para o ambiente  $Q_5$ .

$$e = \frac{\kappa_{fv} (LH \cdot 2 + WL \cdot 2 + WH \cdot 2) (T_{ch} - T_{cv}) \cdot 3,6}{Q_5} \quad (45)$$

TABELA 13 – DADOS DE ISOLAMENTO:

Condutividade térmica da fibra de vidro (kfv)	0,035	W/m.K
---	-------	-------

FONTE: INCROPERA, F. P. ; DE WITT, D. P. FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA, 1994 EDITORA LTC.

E a área em  $\text{m}^2$  de isolamento é igual a:

$$A_{ins} = (LW) \cdot 2 + (HL) \cdot 2 + (WH) \cdot 2 \quad (46)$$

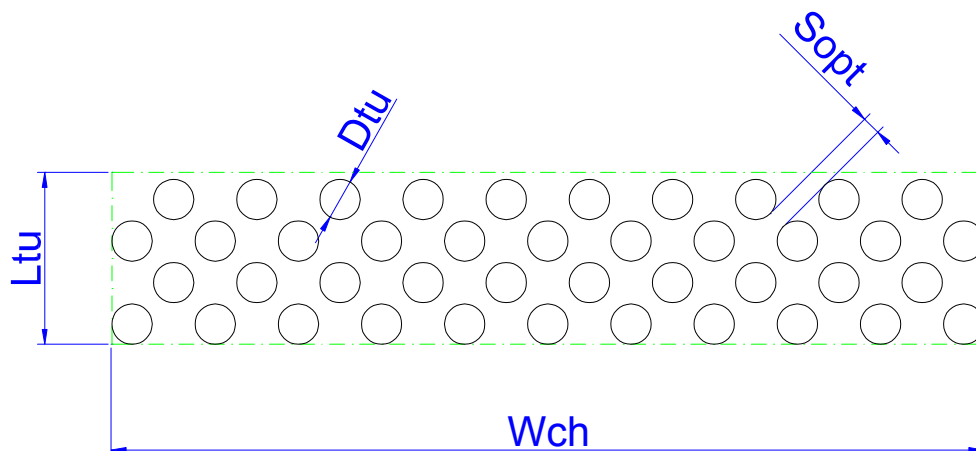
Os tubos trocadores de calor ficam situados acima dos combustores e recebem os gases provenientes da combustão, estes gases atravessam os tubos transferindo o calor dos combustores para a câmara de cozimento, pois os tubos passam por dentro do forno. Há uma distância ótima entre os tubos que permite a melhor transferência de calor possível conforme *Stanescu, Fowler & Bejan (1996)*. Pois quando a distância entre os tubos é pequena a transferência de calor é mais eficiente porém o escoamento entre os tubos é mais difícil, quando a distância entre os tubos é grande o escoamento é bom porém a transferência de calor é ruim temos que S é:

$$S = 2,2 \text{Pr}_{ar}^{-0,13} \left( \frac{D_{tu}}{W_{ch}} \right)^{-0,4} \text{Re}_D^{-0,3} \quad (47)$$

$$S_{opt} = S D_{tu} \quad (48)$$

Onde  $D_{tu}$  é o diâmetro do tubo,  $W_{ch}$  é a largura da câmara de cozimento (ver figura 23) e  $\text{Re}_D$  é o número de Reynolds para este diâmetro.

FIGURA 23 – DISTÂNCIA ENTRE TUBOS TROCADORES DE CALOR



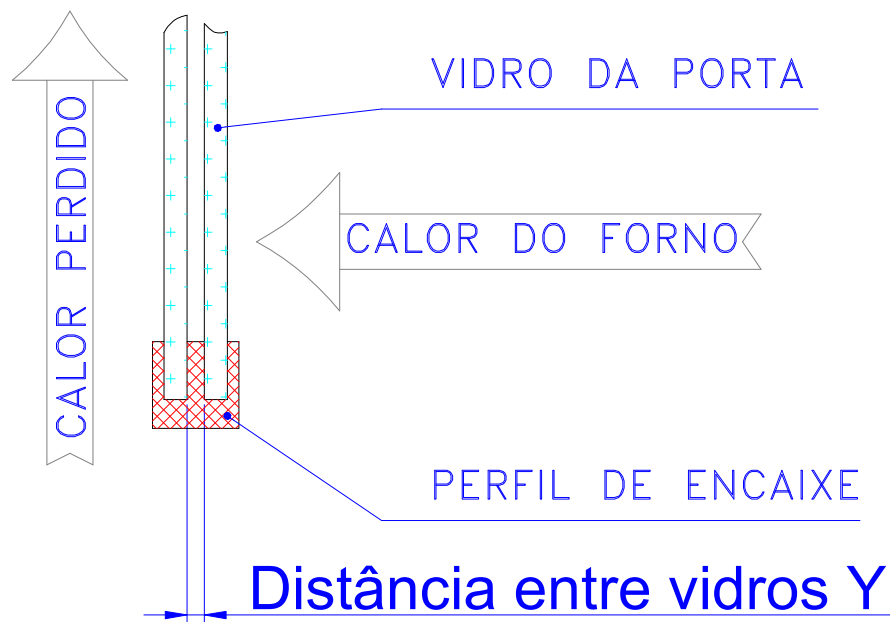
FONTE: O AUTOR

Logo se temos a distância ótima entre tubos  $S_{opt}$  podemos determinar a quantidade de tubos trocadores de calor:

$$n_{tu\ opt} = \frac{W_{ch} L_{tu}}{(S_{opt} D_{tu})^2} \quad (49)$$

Há também uma distância ótima entre os vidros da porta para que não haja transferência de calor por condução ao ambiente e para que não haja convecção natural entre os vidros. As constantes  $\kappa Ra$  e  $nRa$  são tabeladas em função do valor do número de Rayleigh para o vidro da porta. São determinadas então as constantes para se chegar à distância ótima  $Y$  (ver figura 24).

FIGURA 24 – DISTÂNCIA ENTRE VIDROS



FONTE: O AUTOR

O número de Rayleigh para o escoamento no vidro é:

$$Ra_{gl} = \frac{\beta_{ar} g H_{ch}^3 (T_{ch} - T_{\infty})}{\alpha_{ar} \nu_{ar}} \quad (50)$$

com este número de Rayleigh podemos determinar a constante  $\psi$  e  $\psi_{eq}$ :

$$\psi = \kappa Ra Ra_{gl}^{nRa} \quad (51)$$

$$\psi_{eq} = \psi \kappa_{ar} \quad (52)$$

Logo podemos determinar a distância ótima entre vidros conforme a fórmula:

$$Y = \frac{\psi_{eq} (T_{ch} - T_{\infty})}{(Q_f + Q_{sp}^i + Q_{exo} + Q_1^i)} \quad (53)$$

Por último podemos determinar o rendimento do forno pelo método indireto no qual é necessário saber todas as perdas de calor do forno, este cálculo é importante para saber se o projeto é adequado, um valor de 20% é um valor satisfatório. Através da fórmula abaixo é possível determinar:

$$\eta = 1 - \frac{B(q_2 + q_3 + q_4)\tau + Q_5 + \Delta Q_{sp}}{B(PCI + q_c + q_{ar})\tau} \quad (54)$$

Desta forma com base nos cálculos é possível saber qual será o custo de matéria prima necessária para fabricação de cada modelo de forno, antes mesmo de seu projeto estar pronto, já que algumas peças são padrão não importando qual o tamanho do forno.

É possível criar macros em Visual Basic no AutoCad ou outros softwares de desenho mecânico a fim de aproveitar os dados do programa para que elas façam o desenho automaticamente, conforme o cálculo, e também gerem a lista de peças.

## 9 CONCLUSÃO E COMPARAÇÃO COM DADOS REAIS

Comparando os valores medidos com fornos em funcionamento na empresa Haas do Brasil foi possível notar que o dimensionamento é satisfatório, pois o consumo de combustível é próximo do valor real. As temperaturas medidas também estão próximas de fornos funcionando em regime operacional.

O método de determinação do coeficiente de transferência de calor através do balanço térmico é o método mais eficiente, pois leva em conta todos os calores envolvidos no processo de cozimento e desta forma seu resultado é mais preciso, isto é, a formulação matemática é adequada para a análise dos fornos. Outros métodos como a medição por sensor de fluxo, não são tão eficientes e sempre dão margem a erros, de execução de testes e se realmente em laboratório as condições de realização do teste estão de acordo com a realidade.

A transferência de calor por convecção se mostrou predominante para este processo de cozimento, pois a transferência de calor entre o ar quente o pão em cozimento depende da velocidade com que este ar circula através do pão, deve ser levado em conta que um bom projeto da circulação de gases quentes dentro do forno através dos ventiladores é fundamental para o funcionamento do forno. Analisando a transferência de calor por radiação representa apenas onze por cento da transferência de calor total do forno, contra oitenta e nove por cento da convecção.

O gás natural é um combustível eficiente e mais limpo que os outros, sendo menos poluente, e seu custo não está ligado diretamente ao custo do barril de petróleo.

Foi elaborado um programa computacional no software Fortran e este programa realiza um projeto automático do forno, ele é capaz de dimensionar vários detalhes do projeto como: o número de combustores e sua potência; a distância ótima entre os tubos trocadores de calor e a quantidade de tubos; a distância ótima entre

vidros; o tamanho do vidro; a dimensão da câmara; conforme a bandeja for definida determina-se o volume interno; podendo então calcular a vazão do ventilador; o diâmetro do ventilador; a quantidade de ventiladores e a potência deles; a quantidade de chapa de inox usada na construção do forno; a espessura e a quantidade de isolamento térmico. E por fim o rendimento do forno, pode ser calculado, pois foi feito um balanço, que foi calculado em aproximadamente 83%.

Segundo *Rahman (1995)*, o coeficiente de transferência de calor em fornos para o cozimento por convecção deve ser de 20 à 60  $W/m^2K$ . e de acordo com os testes feitos por *Carson, Willix & North (2004)*, o valor para fornos de convecção industriais fica entre 15 e 40  $W/m^2K$ . O valor do coeficiente de transferência de calor por convecção calculado para o forno modelo Turbo Haas foi de 23  $W/m^2K$ , sendo que o coeficiente de transferência de calor por radiação calculado foi de 3  $W/m^2K$ , somando tem-se um coeficiente global de transferência de calor do forno de aproximadamente 26  $W/m^2K$ .

Podemos dizer que o programa está aprovado por que com os cálculos feitos em comparação com as medidas dimensionais do forno pode-se dizer que são muito próximas. Este método de dimensionamento é útil para fornos para cozimento de pães e biscoitos, tanto para fornos intermitentes quanto para fornos tipo túnel, que usem a transferência de calor ao produto por convecção forçada. Este programa será útil para as empresas para o dimensionamento destes fornos.

Contudo o programa ainda pode ser melhorado, e permite algumas sofisticções e facilidades para automatizar a produção e confecção dos desenhos do projeto. E ainda implementar procedimentos de otimização para redução de custos de fabricação. Assim como o projeto do forno propriamente dito, pode ser otimizado em vários pontos para redução das perdas de calor e aumentar a eficiência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEJAN, Adrian. **Transferência de Calor**, 1994, Editora McGraw Hill.
- Catálogo técnico, **Forno Wind**, 1999, Ing. POLIN & C. S.p.A. Verona Itália.
- CARSON, J.K., WILLIX, J., NORTH, M.F. **Measurements of heat transfer coefficients within convection ovens**, 2004, Journal of food engineering 72(2006) 293-301.
- CHARM, Stanley E. **Fundamentals of Food Engineering**, 1971, The AVI Publishing Company, INC.
- COMPAGAS – **Companhia Paranaense de Gás S.A.** — <[www.compagas.com.br](http://www.compagas.com.br)>
- EARLE, R.L, **Unit Operations in Food Processing**, 1983, NZYFST, INC.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física**; vol.2, 1994, Editora LTC.
- INCROPERA, F. P. ; De WITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, 1994 Editora LTC.
- KULP, Karel. **Cookie Chemistry and Technology**, 1994, American Institute of Baking
- MACINTYRE, A., JOSEPH. **Ventilação industrial e controle da poluição**, 1990, Editora Guanabara S.A. - RJ.
- MANLEY, Duncan J.R. **Tecnologia de la Industria Galletera**, 1983, Editora Acribia S.A.
- MATZ, Samuel A. **Bakery Technology and Engineering**, 1960, The AVI Publishing Company, INC.
- MORETTO, E., FETT, R. **Processamento e Análise de Biscoitos**, 1999, Editora Varella LTDA. - SP.
- ONU, **Food Balance Sheet - Wheat**, 2003, FAO, < <http://faostat.fao.org/> >
- QUEIROZ, G.M. **Determinação de propriedades termofísicas do pão francês durante o processo de assamento**, 2001, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química 152p. + Apêndices. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. < [www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)>.
- QUEIROZ, G.M. TADINI, C. C. **Determinação Experimental da difusividade térmica do pão francês durante o processo de assamento**, 2002, XVIII Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos.
- RAHMAN, S. 1995, **Food Properties Handbook**. CRC Press, New York.

STANESCU,G., FOWLER A.J., BEJAN A. **The optimal spacing of cylinders in free-stream cross flow forced convection**, 1996, Journal of heat and mass transfer, Vol.39 num.2 (1996) 311-317.

VITTI, P., GARCIA, E.C., OLIVEIRA, L.M. **Tecnologia de Biscoitos - Manual Técnico I**; 1988, Instituto de Tecnologia de Alimentos - SP.

VLASSOV, Dmitri, Vargas J.V.C., Azevedo C., Carzino, M.C.. **Análise técnica-econômica e ecológica de energéticos**; 2002, II Encontro dos Programas de Recursos Humanos em Petróleo e Gás Natural do Paraná.

VLASSOV, Dmitri. **Combustíveis, Combustão e Câmaras de Combustão**; 2001, Editora UFPR.



## ANEXOS

## ANEXO 1 – SUPRIMENTO DE TRIGO

Tabela 8 - Suprimento e utilização de trigo - Brasil - 1997-2003

Ano	Trigo (em grão)				
	Suprimento (t)			Utilização (t)	
	Estoque inicial	Produção	Importação	Exportação	Perdas pós-colheita
1997	2 965 005	2 489 070	4 909 040	2 631	401 017
1998	2 340 142	2 269 847	6 847 689	6 991	489 434
1999	1 662 012	2 438 197	7 189 213	3 445	477 131
2000	1 743 365	1 669 839	7 836 974	2 241	485 003
2001	1 547 868	3 260 834	7 276 579	1 847	499 941
2002	2 084 624	2 934 659	6 738 284	4 818	477 010
2003	2 212 555	6 029 396	6 162 612	53 037	486 062

Ano	Trigo (em grão)		
	Utilização (t)		
	Disponibilidade interna	Semeadura	Estoque final
1997	7 476 046	143 279	2 340 142
1998	9 173 718	125 524	1 662 012
1999	8 914 840	150 642	1 743 365
2000	9 042 294	172 771	1 547 868
2001	9 287 435	211 435	2 084 624
2002	8 851 749	216 421	2 212 555
2003	8 980 216	254 966	4 630 282

Fontes: Pesquisa de estoques jul./dez.1997-jul./dez.2003. Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, n.2, pt.1, 1998-2004. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Estoques/>. Acesso em: set. 2004; Exportação e importação. In: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior Via Internet - ALICE-Web. 1997-2003. Disponível em: <http://alicesweb.desenvolvimento.gov.br/>. Acesso em: maio 2004; Levantamento sistemático da produção agrícola: pesquisa de previsão e acompanhamento de safras agrícolas no ano civil 1998-2004. Rio de Janeiro: IBGE, v. 10-16, n.3, 1998-2004.

FONTE: IBGE

## ANEXO 2 – PROGRAMA COMPUTACIONAL E VALORES

! Projeto Automático de Forno de Convecção:

```

PROGRAM PROJETO
USE MSIMSLMS
REAL
Ains,As,Asc,Aso,Av,B,Dv,H,Hc,HmH,HmL,L,Lc,N,NuD,NuH,NuL,PQ,Priar,Pr2ar,PrH2O,Pr_ar,Prac,Pv,Qe1,
Qesp,Qi1,Qisp,Q1,q2,Q5,Q5con,Q5doo,Q5lat,Q5rad,Q5rf,Q5rl,Q5roo,Q5rp,Q5rs,Q5vap,Qend,Qexo,Qf,Qvp_al,
RaH,RaL,Rahv,ReD,S,Sopt,V,Vtu,W,Wc,Y,alphaiar,alpha2ar,alpha_ar,alphaac,betaiar,beta2ar,beta_ar,betaac,be
tafH2O,betagH2O,cpiar,cp2ar,cpH2O,cp_ar,cpac,omega,omega_eq,hfgH2O,hrad,htot,kiar,k2ar,kH2O,k_ar,kac,
miar,muiar,mu2ar,muH2O,mu_ar,muac,mv,nuiar,nu2ar,nuH2O,nu_ar,nuac,pH2O,qac,rhoiar,rho2ar,rhoH2O,rho
_ar,rhoac,sigmaH2O,vH2O,CRa,Db,Dtu,Fb,Fi,gama,Lb,Lt,Ltu,PCIm,Tac,Tamb,Tch,Te,Teb,Ti,Tref,Tr,Ts,Uair,
VrealAR,Vdesp,Vtotal_gases,Wt,Cp_comb,cpal,cpb,cpvap,deltap,epsi,epsilonb,epsv,eta,g,hcon,idesp,kpt,kre,m
H2O,mb,mt,nRa,q3,q4,sigma,tg,xH2O,cpm_pg,e,kfv,qc,Arteor,eta_p
INTEGER Tal,nb,na,ntu_opt,COMBUSTIVEL
WRITE(*,*) " ESCOLHA O COMBUSTIVEL A SER USADO"
WRITE(*,*) " 1.GAS NATURAL"
WRITE(*,*) " 2.GLP"
WRITE(*,*) " 3.LENHA"
WRITE(*,*) " 4.OLEO DIESEL"
WRITE(*,*) " 5.ELETRICIDADE"
READ(*,*) COMBUSTIVEL
SELECT CASE (COMBUSTIVEL)
CASE (1)
CALL GAS_NATURAL (Cp_pg, Tref, Tac, Cp_comb, Cp_C2H6, Cp_CH4, Cp_C3H8, Cp_C4H10,
Cp_C5H12, Cp_N2, Cp_CO2, CH4, C2H6, C3H8, C4H10, C5H12, N2, CO2, CM_CH4, CM_C2H6,
CM_C3H8, CM_C4H10, CM_C5H12, CM_N2, CM_CO2, Mm, Patm, R, Tamb, Vcntp, DENS, PCIm, PCIk,
Rk, MO, MN, MH, MC, DensO, DensH, DensN, DensC, percC, percN, percO, percH, SP, ARteor, GAMA,
VrealAR, DensAR, Mmol_CO2, Mmol_H2O, Mmol_N2, Mmol_O2, DensCO2, DensH2O, DensN2, DensO2,
perc_CO2, perc_H2O, perc_N2, perc_O2, Vtotal_gases, Soma_perc_gases, MteorAR, MrealAR,
Massa_total_entra, Delta_massa, Massa_total_sai, Massa_CO2, Massa_H2O, Massa_N2, Massa_O2, erro_perc,
Tf, Delta_Tc, Vm_H2O, Vm_CO2, Cpm_pg, TTCOMB, qc, qac)
CASE (2)
CALL GLP (Tamb, DensGAS, PCIm, PCIk, ARteor, GAMA, VrealAR, DensAR, Vtotal_gases,
MteorAR, MrealAR, Cp_comb, qc, Tac, Cp_ar, qac, Cp_pg, Cpm_pg, TTCOMB )
CASE (3)
CALL LENHA (Tamb, PCIm, PCIk, Vteor_AR, GAMA, VrealAR,
Vtotal_gases, Tf, Cp_comb, qc, Tac, Cp_ar, Qac, Cpm_pg, TTCOMB )
CASE (4)
CALL DIESEL (Patm, R, Tamb, Dens_Diesel, PCIm, PCIk, Vteor_AR, GAMA, VrealAR, DensAR,
Vtotal_gases, Soma_perc_gases, MteorAR,
MrealAR, Massa_total_sai, Massa_total_entra, Tf, Cp_comb, Tac, Tref, Cp_ar, qac, Cp_pg, Cpm_pg, TTCOMB)
!CASE (5)
!CALL ELETRICIDADE ! em fase de elaboração
END SELECT
! Dados Técnicos do Forno
Write(*,*) "INFORME O NÚMERO DE PÃES A SER PRODUZIDO POR HORA"
READ(*,*) nb
Write(*,*) "nb =", nb
Write(*,*) "Entre com as dimensões da bandeja"
READ(*,*) Lt ! Lt=0.78m
READ(*,*) Wt ! Wt=0.58m
Write(*,*) "Lt =", Lt
Write(*,*) "Wt =", Wt
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! DADOS GERAIS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
Tal = 3600 ! tempo de cozimento, s
Write(*,*) "Tal =", Tal

```

```

g = 9.81                                ! aceleração da gravidade (m/s2)
Write(*,*) "g =", g
Uair = 8.42                               ! velocidade do ar do ventilador na câmara de cozimento, m/s
Write(*,*) "Uair =", Uair
hcon = 23                                 ! coeficiente de transferência de calor, W/m2.K
Write(*,*) "hcon =", hcon                ! conforme determinado no balanço térmico do forno
epsv = 1                                  ! emissividade do vidro
Write(*,*) "epsv =", epsv
epsi = 0.7                                ! emissividade do inox
Write(*,*) "epsi =", epsi
sigma = 5.67e-8                           ! Stefan-boltzmann constant, W/m^2.K^4
Write(*,*) "sigma =", sigma
Fi = 1                                     ! Fator de visibilidade do forno em relação ao ambiente
Write(*,*) "Fi =", Fi
mH2O = 1                                  ! massa de água a ser vaporizada (kg)
Write(*,*) "mH2O =", mH2O
kfv = 0.035                               ! coeficiente de condutibilidade térmica da fibra de vidro
Write(*,*) "kfv =", kfv
Vdesp = 0                                  ! volume de gases desprendidos (m3)
idesp = 0                                  ! entalpia dos gases desprendidos (kJ/m3)
! dimensões
na = nb/(66.3*Lt*Wt*2)                   ! Número de assadeiras
! número de pães por metro quadrado de bandeja é 66.3(pães/m2) ! 2 forradas por hora é o padrão
Lc = Lt + 0.252                          ! comprimento da câmara, m
Hc = na * 0.1 + 0.04                     ! altura da câmara, m
Wc = Wt + 0.15                            ! largura da câmara, m
V = Lc * Hc * Wc                          ! volume da câmara, m3
H = Hc + 0.12                             ! Altura do Forno, m
L = Lc + 0.12                             ! Comprimento do Forno, m
W = Wc + 0.12                             ! Largura do Forno, m
Dtu = 0.034                               ! Diâmetro dos tubos trocadores de calor, m
Ltu = 0.145                               ! Comprimento do espaço destinado aos tubos trocadores de calor, m
Vtu = Wc * Ltu * Hc                       ! volume destinado aos tubos trocadores de calor, m3
Write(*,*) "na =", na
Write(*,*) "Lc =", Lc
Write(*,*) "Hc =", Hc
Write(*,*) "Wc =", Wc
Write(*,*) "V =", V
Write(*,*) "H =", H
Write(*,*) "L =", L
Write(*,*) "W =", W
! Dados Técnicos do Pão
mb = 0.06                                 ! massa de um pão antes do cozimento, kg
Write(*,*) "mb =", mb
cpb = 3.1                                 ! calor específico do pão, J/kg.K
Write(*,*) "cpb =", cpb
! Cp_comb = 1.655                          ! calor específico do combustível, kJ/m3.K
Write(*,*) "Cp_comb =", Cp_comb
Db = 0.054                                ! Diâmetro superficial do pão, m
Write(*,*) "Db =", Db
Lb = 0.118                                ! Comprimento do pão, m
Write(*,*) "Lb =", Lb
Fb = 1                                     ! Fator de visibilidade pão x câmara
Write(*,*) "Fb =", Fb
epsilonb = 0.9                             ! emissividade do pão
Write(*,*) "epsilonb =", epsilonb
As = (3.14 * Db * Lb) + 3.14*(Db**2)/2    ! Área superficial do pão, m3
Write(*,*) "As =", As

```

```

Write(*,*) "qc =", qc
Write(*,*) "qac =", qac
! Temperaturas
!Tref = 273                                ! Temperatura de referência, K
!Write(*,*) "Tref =", Tref
Ti = 310                                    ! Temperatura no início do cozimento, K
Write(*,*) "Ti =", Ti
Tac = 293                                   ! Temperatura do ar da combustão, K
Write(*,*) "Tac =", Tac
!Tf = 293                                  ! Temperatura do combustível, K , com pré aquecimento ou não
!Write(*,*) "Tf =", Tf
Tch = 533                                   ! Temperatura da câmara de cozimento, K
Write(*,*) "Tch =", Tch
Ts = 306                                    ! Temperatura superficial do pão, K
Write(*,*) "Ts =", Ts
Teb = 373                                   ! Temperatura de ebulição da água, K
Write(*,*) "Teb =", Teb
Te = 473                                    ! Temperatura no final do cozimento, K
Write(*,*) "Te =", Te
Tr = 323                                    ! Temperatura do revestimento externo (K)
Write(*,*) "Tr =", Tr
!Tamb= 293                                  ! Temperatura ambiente (K)
!Write(*,*) "Tamb=", Tamb
Tg = 573                                    ! temperatura dos gases de escape (K)
Write(*,*) "Tg =", Tg
! Air property functions : From Table A.4
! Units: T(K); 1 atm pressure
rhoac = 1.194      !rho_T("Air",Tamb)      ! Density, kg/m^3
cpac = 1007        !cp_T("Air",Tamb)       ! Specific heat, J/kg·K
muac = 1.811E-5   !mu_T("Air",Tamb)       ! Viscosity, N·s/m^2
nuac = 1.527E-5   !nu_T("Air",Tamb)       ! Kinematic viscosity, m^2/s
kac = 0.02574     !k_T("Air",Tamb)        ! Thermal conductivity, W/m·K
alphaac = 2.158E-5 !alpha_T("Air",Tamb)! Thermal diffusivity, m^2/s
Prac = 0.7088     !Pr_T("Air",Tamb)       ! Prandtl number
betaac = 0.003413 !1/Tamb                ! Volumetric coefficient of expansion, K^(-1); ideal gas
! Air property functions : From Table A.4
! Units: T(K); 1 atm pressure
rhoiar = 1.128    !rho_T("Air",Ti)        ! Density, kg/m^3
cpiar = 1007      !cp_T("Air",Ti)        ! Specific heat, J/kg·K
muiar = 1.89E-5   !mu_T("Air",Ti)        ! Viscosity, N·s/m^2
nuiar = 1.69E-5   !nu_T("Air",Ti)        ! Kinematic viscosity, m^2/s
kiar = 0.02704   !k_T("Air",Ti)        ! Thermal conductivity, W/m·K
alphaiar = 2.40E-5 !alpha_T("Air",Ti)    ! Thermal diffusivity, m^2/s
Priar = 0.7056   !Pr_T("Air",Ti)        ! Prandtl number
betaiar = 0.003226 !1/Ti                ! Volumetric coefficient of expansion, K^(-1); ideal gas

rho_ar = 1.085    !rho_T("Air",Tr)        ! Density, kg/m^3
cp_ar = 1008      !cp_T("Air",Tr)        ! Specific heat, J/kg·K
mu_ar = 1.96E-5   !mu_T("Air",Tr)        ! Viscosity, N·s/m^2
nu_ar = 1.82E-5   !nu_T("Air",Tr)        ! Kinematic viscosity, m^2/s
k_ar = 0.028     !k_T("Air",Tr)        ! Thermal conductivity, W/m·K
alpha_ar = 2.59E-5 !alpha_T("Air",Tr)    ! Thermal diffusivity, m^2/s
Pr_ar = 0.7038   !Pr_T("Air",Tr)        ! Prandtl number
beta_ar = 0.003096 !1/Tr                ! Volumetric coefficient of expansion, K^(-1); ideal gas

rho2ar = 0.7383   !rho_T("Air",Te)        ! Density, kg/m^3
cp2ar = 1025     !cp_T("Air",Te)        ! Specific heat, J/kg·K
mu2ar = 2.60E-5   !mu_T("Air",Te)        ! Viscosity, N·s/m^2

```

```

nu2ar = 3.53E-5 !nu_T("Air",Te) ! Kinematic viscosity, m^2/s
k2ar = 0.03886 !k_T("Air",Te) ! Thermal conductivity, W/m·K
alpha2ar = 5.16E-5 !alpha_T("Air",Te) ! Thermal diffusivity, m^2/s
Pr2ar = 0.6851 !Pr_T("Air",Te) ! Prandtl number
beta2ar = 0.002114 !1/Te ! Volumetric coefficient of expansion, K^(-1); ideal gas
! Water property functions :T dependence, From Table A.6
xH2O = 0 Quality (0=sat liquid or 1=sat vapor)
pH2O = 1.008 !psat_T("Water", Teb) ! Saturation pressure, bar
vH2O = 0.001044 !v_Tx("Water",Teb,xH2O)! Specific volume, m^3/kg
rhoH2O = 958 !rho_Tx("Water",Teb,xH2O) ! Density, kg/m^3
hfgH2O = 2.26E6 !hfg_T("Water",Teb) ! Heat of vaporization, J/kg
cpH2O = 4217 !cp_Tx("Water",Teb,xH2O) ! Specific heat, J/kg·K
muH2O = 0.00028 !mu_Tx("Water",Teb,xH2O) ! Viscosity, N·s/m^2
nuH2O = 2.92E-7 !nu_Tx("Water",Teb,xH2O) ! Kinematic viscosity, m^2/s
kH2O = 0.68 !k_Tx("Water",Teb,xH2O) ! Thermal conductivity, W/m·K
PrH2O = 1.762 !Pr_Tx("Water",Teb,xH2O) ! Prandtl number
sigmaH2O = 0.05893 !sigma_T("Water",Teb) ! Surface tension, N/m (liquid-vapor)
betafH2O = 0.000749 !beta_T("Water",Teb)! Volumetric coefficient of expansion, K^(-1) (f, liquid, x = 0)
betagH2O = 0.002681 !1/Teb ! Volumetric coefficient of expansion, K^(-1) (g, ideal gas, x = 1)
! Vapor d'água property functions :T dependence, From Table A.4
cpvap = 0.4902 ! Specific heat, J/kg·K
! Calor útil ao cozimento
Qi1 = nb*mb*cpb*Ti
Write(*,*) "Qi1 =", Qi1
ReD = Uair * Db * rho2ar / mu2ar
Write(*,*) "ReD =", ReD
NuD = hcon * Db / k2ar
Write(*,*) "NuD =", NuD
hrad = Fb * epsilonb * sigma * (Tch - Ts) * (Tch**2 - Ts**2)
Write(*,*) "hrad =", hrad
htot = hcon + hrad
Write(*,*) "htot =", htot
Q1 = htot * nb * As * (Tch - Ts) ! (kJ) ! 29
Write(*,*) "Q1 =", Q1
Qe1 = Q1 + Qi1
Write(*,*) "Qe1 =", Qe1
! Potência do ventilador
mv = 3600 * V ! vazão do ventilador m3/h !1 volume da camara/s
Write(*,*) "mv =", mv
deltap = 101325 * 0.5 ! delta de pressão do ventilador Pa (+/- 100kPa)
Write(*,*) "deltap =", deltap
Pv = deltap * rho2ar / rhoac ! Pressão necessária do exaustor Pa
Write(*,*) "Pv =", Pv
kre = 1.5 ! coeficiente de reserva de potência
Write(*,*) "kre =", kre
eta = 70 ! rendimento
Write(*,*) "eta =", eta
kpt = 1 ! coeficiente de perdas de transmissão
Write(*,*) "kpt =", kpt
N = mv * Pv * kre * kpt * 0.001 / (3600 * eta) ! potência do ventilador kW
Write(*,*) "N =", N
Av = mv / (Uair * 3600) ! Área do ventilador de circulação do ar quente
Write(*,*) "Av =", Av
Dv = ((4 * Av) / 3.14)**(0.5) ! Diâmetro do ventilador de circulação do ar quente
Write(*,*) "Dv =", Dv
! Calor do combustível
!qc = cf*(Tf-Tref) ! calor físico do combustível, kJ/Nm3
!qac = (cpiar/1000) * VrealAR * (Tac-Tref) ! 1 ! calor físico do ar, kJ/Nm3

```

```

Qcomb = ( PCIm + qc + qac ) ! kJ/m3 ! Calor fornecido pelo combustível
Write(*,*) "Qcomb =", Qcomb
! Calor suplementar fornecido ao forno: compreende a bandeja, ar da câmara, e a potência do ventilador de
circulação de gases
mt = 0.35 ! kJ/kg.K calor específico do alumínio a 300K
Write(*,*) "cpal =", cpal
miar = V* rhoiar ! massa do ar da câmara, kg
Write(*,*) "miar =", miar
Qisp = (mt*cpal*Ti*na) + (miar * (cpiar/1000) * Ti) + (N*Tal) ! 2
Write(*,*) "Qisp =", Qisp
! Calor devido a reações exotérmicas
! Reação de oxidação - C6H12O6=6CO2+6H2O libera entalpia 686 kCal/kg (1293kJ/kg) - Respiração aeróbica
! Reação de fermentação - C6H12O6=2CO2+2C2H5OH libera entalpia 54 kcal/kg (226kJ/kg) - Respiração
anaeróbica presente no pão
! Concentração máxima de açúcares na massa somando-se glicose+maltose+frutose = 0.06 (6%) - (segundo
MATZ)
! Quantidade de açúcar médio de receita é 1%
Qexo = 226 * nb * mb * 0.06
Write(*,*) "Qexo =", Qexo

! Calor de evaporação do álcool da fermentação
! Entalpia de vaporização do álcool = 854kJ/kg
! 1 mol de açúcar fornece 2 mols de álcool e 2 mols de dióxido de carbono
! concentração de açúcar 6%
Qvp_al = nb * mb * 0.06 * 854 * 0.5
Write(*,*) "Qvp_al =", Qvp_al
! Calor devido a reações endotérmicas
! Calor devido a gelatinização do amido
! Entalpia de formação do amido de milho = 2.92kJ/kg
! Entalpia de formação do amido de trigo = 10.04kJ/kg
! Quantidade de amido de milho = 1%
! Quantidade de trigo na massa = 60%
! Quantidade de amido presente na massa = 25%
Qend = 0.25 * nb * mb * 0.01 * 2.92 + 0.25 * nb * mb * 0.6 * 10.04 + Qvp_al
Write(*,*) "Qend =", Qend
! Calor devido aos gases de escape
Write(*,*) "VrealAR =", VrealAR
Write(*,*) "Cpm_pg =", Cpm_pg
Write(*,*) "Vtotal_gases =", Vtotal_gases
q2 = (Vtotal_gases * Cpm_pg * (Tg-Tref) + Vdesp*idesp) - (VrealAR * (cpiar/1000) * (Ti-Tref))
!3 kJ/m3
Write(*,*) "q2 =", q2
q3 = 0 ! kJ/m3 ! calor com dissociação devido a combustão mecânica
q4 = 0 ! kJ/m3 ! calor com dissociação devido a combustão química
! Calor perdido para o ambiente Q5 = Q5con + Q5rad + Q5vap ! 4
RaH = g * beta_ar * H**3 * (Tr - Tamb) / (alpha_ar * nu_ar) !5 ! numero de rayleigh
Write(*,*) "RaH =", RaH
RaL = g * beta_ar * L**3 * (Tr - Tamb) / (alpha_ar * nu_ar) !6 ! numero de rayleigh
Write(*,*) "RaL =", RaL
NuH = (0.825 + (0.387*(RaH**(1.0/6)))/((1.0+((0.492/ Pr_ar)**(9.0/16))))**(8.0/27)))**2 !7 !
numero de Nusselt convectivo em relação a H
Write(*,*) "NuH =", NuH
NuL = 0.15 * (RaL)**(1.0/3) !8 ! numero de Nusselt convectivo em relação a L
Write(*,*) "NuL =", NuL

HmH = NuH * k_ar / H !10 ! coeficiente de transferencia de calor convectivo em relação a H
Write(*,*) "HmH =", HmH
HmL = NuL * k_ar / L !11 ! coeficiente de transferencia de calor convectivo em relação a L

```

```

Write(*,*) "HmL =", HmL
Q5doo = HmH * W * H * (Tr - Tamb)    !12 ! fluxo de calor perdido por convecção pelo fundo e pela porta
Write(*,*) "Q5doo =", Q5doo
! Q5doo é igual para a porta e para o fundo do forno
Q5lat = HmH * L * H * (Tr - Tamb)    !13    ! fluxo de calor perdido por convecção pela lateral
Write(*,*) "Q5lat =", Q5lat
Q5roo = HmL * W * L * (Tr - Tamb)    !14! fluxo de calor perdido por convecção na face superior
Write(*,*) "Q5roo =", Q5roo
! Q5roo é igual para o lastro e para o teto
Q5con = (Q5lat*2) + (Q5roo*2) + (Q5doo * 2)    !15
Write(*,*) "Q5con =", Q5con
Q5rp = epsv * Fi * sigma * H * L * (Tr**4 - Tamb**4)    !16    ! calor perdido por radiação pela porta
Write(*,*) "Q5rp =", Q5rp
Q5rf = epsi * Fi * sigma * H * L * (Tr**4 - Tamb**4)    !17    ! calor perdido por radiação pelo
fundoWrite(*,*) "Q5rf =", Q5rf
Q5rl = epsi * Fi * sigma * H * W * (Tr**4 - Tamb**4)    !18    ! calor perdido por radiação pela face
lateral
Write(*,*) "Q5rl =", Q5rl
Q5rs = epsi * Fi * sigma * W * L * (Tr**4 - Tamb**4)    19! calor perdido por radiação pela face superior
Write(*,*) "Q5rs =", Q5rs
Q5rad = Q5rp + Q5rf + (Q5rl * 2) + (Q5rs * 2)    !20! calor perdido por radiação Write(*,*) "Q5rad =", Q5rad
Q5vap = ( mH2O * (cpH2O/1000) * (Teb - Tamb) ) + (mH2O * hfgH2O/1000) + (mH2O * (cpvap/1000) * (Teb
- Te))    !21    ! calor perdido pela água da vaporização (kJ)
Write(*,*) "Q5vap =", Q5vap
Q5 = Q5con + Q5rad + Q5vap
Write(*,*) "Q5 =", Q5
! e = 0.06                                ! espessura do isolamento (m)
! kfv = 0.035                            ! coeficiente de condutibilidade térmica da fibra de vidro
Qesp = (mt * cpal * Te* na) + (miar * (cp2ar/1000) * Te)    ! (kJ) ! 27
Write(*,*) "Qesp =", Qesp
Qsp= Qesp - Qisp
! equação do balanço
B = (Qe1 + Q5 + Qesp + Qend - Qi1 - Qisp - Qexo)/((Qcomb - q2 - q3 - q4)*Tal)    ! (kJ) !28
Write(*,*) "B =", B
Qf = (B * ( PCIm + qc + qac ) * Tal)    ! (kJ) Calor fornecido pelo combustível, kJ
Write(*,*) "Qf =", Qf
! Cálculos do Forno
PQ = B * PCIm * Tal / 4.186    ! potência dos combustores, Kcal/h
Write(*,*) "PQ =", PQ
Asc = Lc * Wc * 1.1 + ( Hc * Lc * 1.1 ) * 2 + ( Wc * Hc * 1.1 ) * 2 ! Área de chapa da câmara, m2
Write(*,*) "Asc =", Asc
Aso = (L * W * 1.1)*2 + ( H * L * 1.1 ) * 2 + ( W * H * 1.1 ) * 2    ! Área de chapa externa do forno, m2
Write(*,*) "Aso =", Aso
Tvi = Wc * Hc    ! Tamanho do vidro, m2
Write(*,*) "Tvi =", Tvi
Ains = (L * W * 1.1)*2 + ( H * L * 1.1 ) * 2 + ( W * H * 1.1 ) * 2    ! Área de isolamento térmico, m2
Write(*,*) "Ains =", Ains
e = (kfv * (L*H*2 + W*L*2 + W*H*2) * (Tch - Tr) * 3.6) / (Qf + Qisp + Qexo + Qi1) ! espessura de
isolamento
Write(*,*) "e =", e
! Distância entre Tubos trocadores de calor
! S = 2 * ((Ltu / Dtu)** 0.4) * (ReD**(-0.28)) * (Pr2ar**(-0.815)) * (Pr2ar/Prw)**0.05    ! distância optima entre
tubos livro do Bejan
! Prw=0.72
S = 2.2 * (Pr2ar**(-0.13)) * (( Dtu/ Wc)**(-0.4)) * (ReD**(-0.3))    ! S = Sopt / Dtu
Write(*,*) "S =", S
Sopt = S * Dtu    ! distância optima entre tubos Artigo
Write(*,*) "Sopt =", Sopt

```

```

ntu_opt = Wc * Ltu / (Sopt + Dtu)**2           ! número ótimo de tubos
Write(*,*) "ntu_opt =", ntu_opt
! Distância entre Vidros
Rahv = (beta2ar * g * Hc**3 * (Tch - Tamb)) / (alpha2ar * nu2ar)   ! número de Rayleigh para a distância
entre vidros
Write(*,*) "valor de Rahv" ,      Rahv
! Tabela de CRa e nRa
if (Rahv < 1E3) then
CRa = 1
nRa=1
else
    if (Rahv < 1E6 ) then
CRa = 0.105
nRa=0.3
    else
        if (1E6 < Rahv) then
CRa = 0.4
nRa=0.2
        End if
    End if
End if
omega = CRA * Rahv**nRa
Write(*,*) "valor de omega" , omega
omega_eq = omega * k2ar
Write(*,*) "valor de omega_eq" , omega_eq
Y = omega_eq * (Tch - Tamb) / (Qf + Qisp + Qexo + Qi1)
Write(*,*) "valor de Y" , Y
eta_p = 1 - ( (B*(q2 + q3 + q4)*Tal + Q5 + Qsp) / Qf )
Write(*,*) "valor de eta_p" ,      eta_p
END PROGRAM PROJETO
RESULTADOS:
ESCOLHA O COMBUSTIVEL A SER USADO
1.GAS NATURAL
2.GLP
3.LENHA
4.OLEO DIESEL
5.ELETRICIDADE
1
DADOS GAS NATURAL
METANO      -> COMPONENTE CH4
ETANO       -> COMPONENTE C2H6
PROPANO     -> COMPONENTE C3H8
BUTANO      -> COMPONENTE C4H10
PENTANO     -> COMPONENTE C5H12
NITROGENIO  -> COMPONENTE N2
DIOXIDO DE CARBONO -> COMPONENTE CO2
SC -> SOMA DOS COMPONENTES
VALOR DE SC =      100
COMPOSICAO MOLAR DE CH4
VALOR DE CM_CH4 =  16.042600
COMPOSICAO MOLAR DE C2H6
VALOR DE CM_C2H6 =  30.069400
COMPOSICAO MOLAR DE C3H8
VALOR DE CM_C3H8 =  44.096200
COMPOSICAO MOLAR DE C4H10
VALOR DE CM_C4H10 =  58.123000
COMPOSICAO MOLAR DE C5H12
VALOR DE CM_C5H12 =  72.149800

```







COMPOSICAO MOLAR DE N2  
 VALOR DE CM\_N2 = 28.013400  
 COMPOSICAO MOLAR DE CO2  
 VALOR DE CM\_CO2 = 44.009800  
 MASSA POR MOL DO GAS = Mm  
 VALOR DE Mm = 17.366920  
 ENTRE VALOR DE Tamb =  
 293  
 VALOR DE Tref = 273.000000  
 VALOR DE Patm = 101325.000000  
 VALOR DE R = 8.314000  
 VALOR DE DENS = 7.752947E-01  
 PODER CALORIFICO INFERIOR DO GAS EM kJ/m  
 VALOR DE PCIm = 37515.500000  
 PODER CALORIFICO INFERIOR DO GAS EM kJ/kg  
 VALOR DE PCIk = 48388.700000  
 VALOR DE Rk = 478.726200  
 MASSA MOLECULAR DO OXIGENIO  
 VALOR DE MO = 15.999400  
 MASSA MOLECULAR DO HIDROGENIO  
 VALOR DE MH = 1.007900  
 MASSA MOLECULAR DO NITROGENIO  
 VALOR DE MN = 14.006700  
 MASSA MOLECULAR DO CARBONO  
 VALOR DE MC = 12.011000  
 VALOR DE DensO = 7.142457E-01  
 VALOR DE DensH = 4.499470E-02  
 VALOR DE DensN = 6.252875E-01  
 VALOR DE DensC = 5.361954E-01  
 Percentagem de carbono no gas = percC  
 VALOR DE percC = 74.126920  
 Percentagem de hidrogenio no gas = percH  
 VALOR DE percH = 24.394910  
 Percentagem de nitrogenio no gas = percN  
 VALOR DE percN = 1.420000  
 Percentagem de oxigenio no gas = percO  
 VALOR DE percO = 5.816668E-02  
 VALOR DE SP = 99.999990  
 VALOR DE ARteor = 9.953399  
 ENTRE VALOR DE GAMA =  
 1.05  
 VALOR DE VrealAR = 10.451070  
 valor de Mmol\_CO2 = 44.009800  
 valor de Mmol\_H2O = 18.015200  
 valor de Mmol\_N2 = 28.013400  
 valor de Mmol\_O2 = 31.998800  
 VALOR DE DensAR = 1.287938  
 valor de DensCO2 = 1.964687  
 valor de DensH2O = 8.042351E-01  
 valor de DensN2 = 1.250575  
 valor de DensO2 = 1.428491  
 valor de Vm\_CO2 = 1.066500  
 valor de Vm\_H2O = 2.218962  
 valor de Vm\_N2 = 8.270544  
 valor de Vm\_O2 = 1.045106E-01  
 valor de Vtotal\_gases = 11.660520  
 valor de perc\_CO2 = 9.146249E-02  
 valor de perc\_H2O = 1.902971E-01





valor de perc\_N2 = 7.092777E-01  
 valor de perc\_O2 = 8.962775E-03  
 valor de Soma\_perc\_gases = 1.000000  
 VALOR DE MteorAR = 12.819360  
 valor de MrealAR = 13.460320  
 valor de Massa\_CO2 = 2.095338  
 valor de Massa\_H2O = 1.784567  
 valor de Massa\_N2 = 10.342940  
 valor de Massa\_O2 = 1.492925E-01  
 valor da Massa\_total\_sai= 14.372130  
**BALANCO MASSICO DA COMBUSTÃO**  
 Valor de Massa\_total\_entra = 14.235620  
 valor do delta de massa= -1.365175E-01  
 valor do erro percentual= -9.589857E-01  
 valor do delta de temperatura= 30.000000  
 valor de Cp\_CH4 35.148910  
 valor de Cp\_C2H6 51.493900  
 valor de Cp\_C3H8 71.452060  
 valor de Cp\_C4H10 95.018550  
 valor de Cp\_C5H12 96.564670  
 valor de Cp\_N2 29.049610  
 valor de Cp\_CO2 36.757690  
 valor de Cp\_comb 1.625854  
 valor de qc 32.517080  
 valor de Cp\_ar 29.028060  
 valor de qac 270.869900  
 valor de Cp\_g\_CO2 49.749580  
 valor de Cp\_v\_H2O 38.711190  
 valor de Cp\_g\_N2 31.379870  
 valor de Cp\_g\_O2 33.290360  
 valor de Cp\_pg 34.472260  
 valor de Cpm\_pg 1.538940  
**TEMPERATURA TEÓRICA DE COMBUSTÃO**  
 valor de TTCOMB 2107.508000  
**INFORME O NÚMERO DE PÃES A SER PRODUZIDO POR HORA**  
 540  
 nb = 540  
 Entre com as dimensões da bandeja  
 .78  
 .58  
 Lt = 7.800000E-01  
 Wt = 5.800000E-01  
 Tal = 3600  
 g = 9.810000  
 Uair = 8.420000  
 hcon = 23.000000  
 epsv = 1.000000  
 epsi = 7.000000E-01  
 sigma = 5.670000E-08  
 Fi = 1.000000  
 mH2O = 1.000000  
 kfv = 3.500000E-02  
 na = 9  
 Lc = 1.032000  
 Hc = 9.400000E-01  
 Wc = 7.300000E-01  
 V = 7.081584E-01  
 H = 1.060000





L = 1.152000  
W = 8.500000E-01  
mb = 6.000000E-02  
cpb = 3.100000  
Cp\_comb = 1.625854  
Db = 5.400000E-02  
Lb = 1.180000E-01  
Fb = 1.000000  
epsilonb = 9.000000E-01  
As = 2.458620E-02  
qc = 32.517080  
qac = 270.869900  
Ti = 310.000000  
Tac = 293.000000  
Tch = 533.000000  
Ts = 306.000000  
Teb = 373.000000  
Te = 473.000000  
Tr = 323.000000  
Tg = 573.000000  
Qi1 = 31136.400000  
ReD = 12911.160000  
NuD = 31.960890  
hrad = 2.206171  
htot = 25.206170  
Q1 = 75965.770000  
Qe1 = 107102.200000  
mv = 2549.370000  
deltap = 50662.500000  
Pv = 31326.740000  
kre = 1.500000  
eta = 70.000000  
kpt = 1.000000  
N = 4.753777E-01  
Av = 8.410432E-02  
Dv = 3.273214E-01  
Qcomb = 37818.890000  
mt = 3.500000E-01  
cpal = 8.750000E-01  
miar = 7.988027E-01  
Qisp = 2815.159000  
Qexo = 439.344000  
Qvp\_al = 830.088000  
Qend = 879.118900  
VrealAR = 10.451070  
Cpm\_pg = 1.538940  
Vtotal\_gases = 11.660520  
q2 = 4994.055000  
RaH = 2.302171E+09  
RaL = 2.955136E+09  
NuH = 158.909100  
NuL = 215.253600  
HmH = 4.197598  
HmL = 5.231860  
Q5doo = 113.461100  
Q5lat = 153.773100  
Q5roo = 153.691100  
Q5con = 841.850600

Q5rp = 243.334500  
Q5rf = 170.334100  
Q5rl = 125.680600  
Q5rs = 136.588700  
Q5rad = 938.207000  
Q5vap = 2597.311000  
Q5 = 4377.369000  
Qesp = 1690.986000  
B = 6.741064E-04  
Qf = 91778.230000  
PQ = 21749.160000  
Asc = 4.472512  
Aso = 6.822904  
Tvi = 6.862000E-01  
Ains = 6.822904  
e = 1.300808E-03  
S = 4.604925E-01  
Sopt = 1.565675E-02  
ntu\_opt = 42  
valor de Rahv 2.269574E+09  
valor de omega 29.733700  
valor de omega\_eq 1.155451  
valor de Y 2.197909E-03  
valor de eta\_p 8.325019E-01  
Press any key to continue

## ANEXO 3 – TABELA DE EQUIPAMENTOS

Equipamento	Fabricante	Modelo	Faixa de medição	Resolução
	Termômetro de contato	Testo	Thermotemp	-50°C à 400°C  0,1°C precisão ±3%
	Medidor de vazão	Krom Schroeder	DM-50-Z65	2m <sup>3</sup> /h à 100m <sup>3</sup> /h  0,1m <sup>3</sup> /h
	Máquina Fotográfica	Canon	Powershot G2	-  4,0MegaPixels
	Termopar	Prompt	Tipo “J” 6x40mm com cabo blindado	-210°C à 760°C  0,1%

	Balança Eletrônica	Filizola	Polycont-17	0.025 à 16995kg	1g
	Paquímetro	Mitutoyo	-	0-150mm	0,05mm
	Módulo de aquisição de dados	LRI informática industrial	LRI-7018	-	-
	Módulo conversor RS485-RS232	LRI informática industrial	LRI-7520	-	-

	Forno de convecção + armário de fermentação	Haas do Brasil	Turbo Haas 540	540 pães/hora	-
	Amassadeira	Haas do Brasil	Ares 25N	25kg/hora	-
	Termômetro de contato	Testo	Thermotemp	-40°C à 230°C	0.1°C precisão ±0.8°C
	Termômetro digital à laser	Ray-Tek	Minitemp MT-4	-18°C à 275°C	0.1°C precisão ±2°C

## ANEXO 4 – A HAAS DO BRASIL

Há quase um século, o nome da Haas está ligado às principais conquistas do setor de máquinas para a indústria da alimentação. Presente em cinco continentes, com 13 unidades em sete países (ver figura 25), tornou-se um grupo de proporções mundiais. Hoje, o grupo austríaco Franz HAAS Waffelmaschinen atua em mercados cada vez mais diversificados, emprega um total de 1.050 funcionários e alcança um faturamento da ordem de US\$150 milhões.

FIGURA 25 – PLANTA DA HAAS DO BRASIL EM CURITIBA



FONTE: HAAS DO BRASIL

Desde a sua fundação, em 1905, várias gerações da família Haas dedicaram-se à condução administrativa do Grupo, superando desafios e impondo uma visão estratégica baseada na inovação. Foi assim que a pequena oficina de máquinas em Viena deu origem a uma empresa que se tornaria, a partir dos anos 40, a marca líder na fabricação de linhas industriais para produção de wafer.

Na década de setenta o Grupo Haas iniciou seu processo de expansão global



e escolheu o Brasil para sediar a primeira unidade fora da Áustria. Acreditando no desenvolvimento dos mercados da América do Sul, instalou seu centro de operações na Cidade Industrial de Curitiba.

FIGURA 26 – FOTO DA FÁBRICA DA HAAS DO BRASIL-MÁQUINA DE CORTE LASER



FONTE HAAS

A criação da Haas do Brasil, em 1977, tornou-se um marco na história da nossa indústria alimentícia. Transformou-se numa verdadeira geradora de soluções, oferecendo aos empresários brasileiros e sul-americanos toda a tecnologia que até então só era disponível no primeiro mundo. Hoje a Haas pesquisa e desenvolve alta tecnologia para a fabricação de suas máquinas. Investe no aprimoramento de seu parque industrial e na especialização de sua mão-de-obra.

As linhas automáticas fabricadas pela Haas são projetadas em modernas

estações computadorizadas para desenhos técnicos “CAD” tridimensionais. Um recurso de última geração que assegura os melhores resultados no trabalho de personalização de cada equipamento, na medida das necessidades do cliente. O programa de produção da Haas abrange desde pequenas máquinas manuais e equipamentos semi-automáticos, até linhas de produção totalmente automatizadas.

FIGURA 27 – FOTO DA FÁBRICA DA HAAS DO BRASIL-USINAGEM



FONTE: HAAS DO BRASIL

Criada em 1994, a divisão de panificação é a empresa do Grupo Haas que se dedica à produção de uma completa linha de equipamentos para panificação e confeitaria. Ela fornece soluções personalizadas, oferecendo equipamentos para todas as classes de clientes, desde pequenas panificadoras até indústrias de panificação.

FIGURA 28 – FOTO DA FÁBRICA DA HAAS DO BRASIL-MONTAGEM DE MÁQUINAS



FONTE HAAS DO BRASIL

No ano de 1988 o grupo Haas adquiriu a empresa Hecrona, para entrar no mercado de biscoitos laminados e moldados, depois de uma reestruturação completa dessa empresa a Haas transferiu para sua matriz a fabricação dessas máquinas e depois de dominar os conceitos destes novos produtos essas máquinas passaram a ser fabricadas também na Haas do Brasil a partir do ano de 2002. Sendo hoje a Haas do Brasil a empresa mais completa do grupo pois é a única que faz todos os tipos de máquinas do grupo.

FIGURA 29 – FOTO DA FÁBRICA DA HAAS DO BRASIL-MONTAGEM DE FORNOS



FONTE HAAS DO BRASIL