



isec
Engenharia

MESTRADO EM ENGENHARIA E
GESTÃO DE ATIVOS FÍSICOS

**Forno com tecnologia infravermelha
para indústria panificadora**

Autor

Marco Miguel Dias Fernandes

Orientador

Professor Doutor José Manuel Torres Farinha

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, dezembro, 2022



isec

Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELETROMECAÂNICA

Forno com Tecnologia Infravermelha para Indústria Panificadora

Relatório de Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia e Gestão De Ativos Físicos.

Autor

Marco Miguel Dias Fernandes

Orientador

Professor Doutor José Manuel Torres Farinha

Co-Orientador

Professor Doutor Hugo David Nogueira Raposo

AGRADECIMENTOS

A realização desta tese de mestrado exigiu foco e determinação, conciliar a minha vida pessoal e carreira profissional com a realização desta tese foi dos maiores desafios que tive até ao momento, agradeço por isso a todos os que me ajudaram direta ou indiretamente na conclusão desta tese e não me deixaram desistir e incentivaram para a conclusão da mesma.

Aos professores orientadores Professor Doutor Hugo Raposo pelas sugestões e por toda ajuda prestada na elaboração deste documento e ao Professor Doutor José Manuel Torres Farinha pela sugestão do tema.

A todos os docentes do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra que fizeram parte do meu percurso académico, desde a licenciatura ao mestrado.

Aos meus colegas do Mestrado de Engenharia e Gestão de Ativos Físicos pela partilha de preocupações e conhecimento.

A todos os meus amigos pelas palavras de incentivo à conclusão desta tese em particular à família SFASC que ocupam um lugar muito especial na minha vida.

Por último agradecer à minha família, pela oportunidade que me concederam de concluir os meus estudos, mas também pelas palavras de incentivo e encorajamento, embora os últimos tempos não tenham sido fáceis mostraram sempre a preocupação e fizeram força para que conseguisse concluir este trabalho.

A todos estes e aqueles que não mencionei, o meu profundo obrigado.

RESUMO

Neste documento serão abordadas as múltiplas fases do projeto de desenvolvimento e produção de um forno industrial direcionado à indústria panificadora recorrendo ao uso de tecnologias infravermelhas.

Estas tecnologias apresentam características energéticas muito interessantes com consumos a rondar os 20% de um forno convencional e reduções de tempos de aquecimento na ordem dos 80% perspetivando revolucionar este segmento de mercado no que toca a consumos e eficiência energética.

O presente relatório será organizado primeiramente com uma abordagem mais teórica onde será feito um estudo energético e económico da tecnologia a implementar no forno e posteriormente comparar resultados com as atuais soluções presentes no mercado tirando as devidas conclusões, fazendo ainda uma análise do que já foi feito e do que ainda falta fazer no que toca a esta tecnologia e a sua aplicação na indústria panificadora mais especificamente a sua aplicação em fornos.

Também num âmbito mais teórico será efetuada uma análise à tecnologia infravermelha em estudo, onde serão apresentados alguns aspetos relevantes da tecnologia.

A segunda parte deste projeto consiste no desenvolvimento do forno em si, onde se pretende realizar todos os cálculos necessários de modo a escolher as opções que melhor se adaptam aos resultados que se pretendem obter, nomeadamente o modelo das resistências a usar, ao modelo e a sua disposição dentro do forno.

Uma vez que alguns dos materiais presentes na construção de um primeiro protótipo podem ter elevado custo a ideia é realizar primeiramente simulações com software computacional com o objetivo de simular as transferências de calor associadas à tecnologia dentro do forno e daí perceber a viabilidade económica para avançar para uma construção de um primeiro protótipo, podendo a partir daí efetuar uma comparação direta face às atuais alternativas do mercado.

Palavras-Chave: Forno, Indústria Panificadora, Resistências, Infravermelho, Eficiência Energética

ABSTRACT

This document will address the multiple phases of development and production of an industrial oven aimed at bakery using infrared technologies. These technologies have quite interesting energetic characteristics, with an estimate consumption around 20% of a conventional oven and reductions in heating times of around 80%, promising to revolutionize the market segment in terms of consumption and energy efficiency. The document will be firstly organized with a more theoretical approach where an energy and economic study of the technology to be implemented in the oven will be made and later compare results with the solutions currently on the market, drawing the appropriate conclusions, also making an analysis of what has already been done and what remains to be done with regard to this specific technology and its application in the bakery industry, more specifically its application in ovens. Also, in a more theoretical scope will be made an analysis of the infrared technology under study, where some relevant aspects of the technology will be presented.

The second part of this project consists of the development of the oven itself, where all the calculations required will be made in order to choose the options that best adapt to the results looked for, as the model of resistances used, the required power output and even their disposal inside the oven. Since some of the materials present in the construction of a first prototype may have quite a high cost the idea is to first perform several simulations in a heat transfer simulator software, in order to understand and analyse the heat transfers associated with technology in study inside the oven and from there try to understand the economic viability to proceed to construction of a first prototype making the direct comparison with the current alternatives on the market

Keywords: Oven, Bakery Industry, Resistances, Infrared, Efficiency.

“Eu não tenho ídolos. Tenho admiração por trabalho, dedicação e competência.”

Ayrton Senna

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS.....	vii
SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS.....	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação e Contexto	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura do documento	4
2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO	6
2.1 Estado da Arte	6
2.1.1 Aplicações atuais de IR na indústria.....	10
2.1.2 Potencial de Inovação	11
2.2 Transferência de Calor	13
2.2.1 Princípios chave de aquecimento e transferência de calor	13
2.2.1.1 Definições.....	13
2.2.1.2 Leis Fundamentais.....	13
2.2.2 Métodos de transferência de calor	14
2.2.3 Calor Infravermelho (IR).....	14
2.2.3.1 Leis fundamentais do aquecimento infravermelho.....	16
2.2.3.2 Aplicações do aquecimento IR a materiais	17
2.3 A Tecnologia Infravermelha no aquecimento Industrial.....	18
2.3.1 Elementos de Aquecimento infravermelho.....	19
2.3.1.1 Elementos cerâmicos	19
2.3.1.2 Elementos de Quartzo.....	20
2.3.1.3 Elementos de Tungstênio/ Halogéneo	20
2.3.2 Aplicação das diversas tecnologias de Aquecimento Infravermelho.....	21
2.3.3 Considerações acerca da tecnologia	23
2.4 Fornos Infravermelhos	23

2.5 IR no cozimento de Pão.....	24
2.5.1 Indústria panificadora – Cozimento do Pão.....	25
3. DIMENSIONAMENTO / PROJETO.....	26
3.1 Modelação do Forno Industrial.....	26
3.1.2 Dimensões Gerais do Forno.....	26
3.2 Seleção dos elementos IR a utilizar.....	29
3.2.1 Aspetos gerais a considerar na seleção do elemento IR:.....	29
3.3 Seleção do Estudo de Caso (Discussão de resultados).....	48
4. Análise Computacional (CFD).....	49
4.1. Software de análise CFD (SOLIDWORKS Flow Simulation).....	49
4.2. ESTUDO DE CFD PARA O FORNO.....	49
4.2.1. Simulações CFD.....	50
4.2.1.1 Simulação CFD Estudo de Caso 1 iteração 1.....	51
4.2.1.2. Simulação CFD Estudo de Caso 1 iteração 2.....	52
4.2.2 Conclusão do ESTUDO CFD / DECISÃO.....	53
4.3 INVENTÁRIO PEÇAS / QUANTIDADES.....	54
4.6.1. Orçamento Estimado.....	54
6.1 Plano de Manutenção Protótipo I.....	60
6.1.1 Ações de Manutenção Preventiva Protótipo I.....	60
6.2. Tempo de Vida útil do Protótipo I.....	61
7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo médio por fonte de energia [tep/ano]	2
Figura 2- Consumo médio por fonte de energia [€/ano]	2
Figura 3 - Tipo de Gerador de calor.....	2
Figura 4 - Solução de Forno VCB apresentada por Jovicic	8
Figura 5 - Forno desenvolvido baseado no tipo VCB	8
Figura 6 - Patente US 7,323,663 B2.....	9
Figura 7 - Power consumption on a Eletric Oven.....	12
Figura 8 - Relação entre comprimento de onda e frequência em IR.....	15
Figura 9 - Diagrama de radiação	15
Figura 10- Gama de comprimentos de onda em IR	16
Figura 11- Tipos de saída de radiação IR (Ceramicx).....	17
Figura 12 - Comprimento de onda IR	18
Figura 13 - Elementos cerâmicos (Ceramicx)	19
Figura 14 - Elementos cerâmicos de Plano (Ceramicx)	19
Figura 15 - Elementos de Quartzo (Ceramicx)	20
Figura 16 - Elementos de Halogéneo (Ceramicx)	21
Figura 17 - Tabela Ceramicx aplicabilidades	21
Figura 18- Tabela Ceramicx aplicabilidades parte 2.....	22
Figura 19 - Render Forno Solidworks 1	27
Figura 20 - Render Forno Solidworks 2	28
Figura 21 - Render forno Solidworks 3.....	28
Figura 22 - Diagrama dimensional da QHS.....	32
Figura 23 - Acessórios para Elementos Quartzo (catálogo ceramicx).....	32
Figura 24 - Projetor QTSR para QHS (catálogo ceramicx)	33
Figura 25- FAST IR (catálogo ceramicx)	34
Figura 26 - Resistências QHS	34
Figura 27 - QTSR (Dimensões Gerais).....	35
Figura 28 - QTSR (perspetivas)	35
Figura 29 - FAST IR (PERSPECTIVAS SW).....	35
Figura 30- FAST IR (DIAGRAMA DIMENSIONAL).....	36
Figura 31- ESTUDO DE CASO 1 1ª ITERAÇÃO	37
Figura 32- ESTUDO CASO 1 2ª ITERAÇÃO.....	38
Figura 33 - Elemento FQE (Catálogo ceramicx).....	39
Figura 34 - Gráfico características elementos FQE.....	40
Figura 35 - Close up gráfico	41
Figura 36 - PAS - PAS 1 (Catálogo Ceramicx)	43
Figura 37 - Elemento IR FQE.....	44
Figura 38 - PAS 1 dimensões gerais.....	44
Figura 39 - PAS 1 perspetivas	45
Figura 40 - Estudo de Caso 2 1ª iteração	46
Figura 41 – Estudo de Caso 2 2ª iteração.....	47
Figura 42 - CFD EC1 IT1	51
Figura 43 - CFD EC1 IT2	52
Figura 44 - PERFIL CFD EC1 IT2.....	53
Figura 45 - Forno convecção Maxima 43.5x31.5	55

ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 1 -The infrared absorption bands for chemical groups and relevant food components [7].....	24
Tabela 2 - Intensidade da penetração de ondas curtas em Alimentos, [7]	25
Tabela 3 - Estudo Económico Forno Convencional vs Protótipo I.....	58

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

IR- INFRAVERMELHOS;

°C – Unidade de temperatura Celsius

ΔU – Variação da Energia Interna;

Q – Calor;

T – Trabalho;

W -watts;

J – Joule;

Φq – fluxo de calor;

kWh – kilowatt hora;

FHS – Full Halogen Short;

QTSR – Quartz Tungsten Short Reflector;

QTS – Quartz Tungsten Short;

QHS – Quartz Halogen Short;

PAS – Projector Aluminised Steel;

CFD - Computational Fluid Dynamics;

PNEC - Plano Nacional de Energia e Clima;

CAD - Computer-Aided Design;

VCB - Volumetric Ceramic Burner;

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Contexto

Cada vez mais vivemos num planeta onde o tema eficiência energética é um ponto fulcral no panorama político-social, ocupando mesmo o centro de debate de muitas das decisões e estratégias políticas praticadas pelos mais altos dirigentes mundiais.

Em Portugal não é diferente, o Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC 2030) e o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 mostram que a eficiência energética é mesmo uma prioridade para se alcançarem os objetivos propostos em matéria de neutralidade carbónica.

É do conhecimento do cidadão comum que a necessidade de adotar escolhas mais conscientes no que toca ao consumo energético urge, cabe a cada um de nós fazer escolhas eficientes que representem um menor impacto no meio ambiente, tendo esta filosofia em mente uma das principais metas apontada no PNEC 2030 foi a redução da dependência energética para 65% em 2030 e para valores inferiores a 20% em 2050.

Embora a implementação de práticas mais amigas do ambiente por cada um de nós, cidadãos comuns, possa fazer a diferença relativamente ao consumo energético, as indústrias são aquelas que devido à sua maior dependência energética uma pequena melhoria nas práticas energéticas pode ter repercussões significativamente positivas.

Segundo estudos realizados pelo observatório da energia em 2020, a indústria representava uma fatia de 30% do peso relativo no consumo de energia final a nível nacional, valor este que representa a média de valores praticados durante uma década (2009-2019).

Desses 30% as maiores fatias de consumo energético nas indústrias distribuem-se pela cogeração entre os 21% e os 29%, Gás natural cerca de 26% e a Eletricidade com uma fatia a rondar os 31% do total de energia consumida, sendo as restantes parcelas distribuídas pela biomassa e petróleo [1].

Ao analisar estes dados percebe-se que as indústrias continuam a ser uma das fontes de maior consumo elétrico a nível nacional, replicando-se o cenário a nível global.

A questão da eficiência energética é fundamental para todas as indústrias e a indústria panificadora, indústria sobre a qual este projeto incide, não é exceção.

Estima-se que só em Portugal existam cerca de 6906 empresas ligadas ao ramo da panificação e pastelaria industrial, onde o maior consumo médio global por empresa é registado do decorrer do uso de lenha com cerca de 110 tep/ano seguindo se a eletricidade com cerca de 35 tep/ano, conforme apresentado na Figura 1. [2]

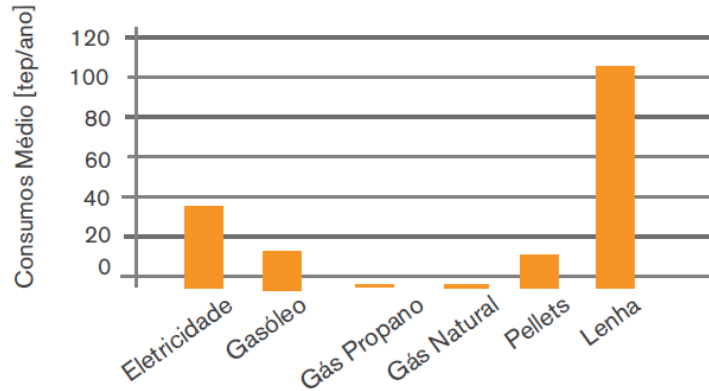


Figura 1 - Consumo médio por fonte de energia [tep/ano] Fonte: [2]

Se for feita uma análise comparativa €/ano, existem três principais focos de consumo representados no seguinte quadro de consumos (Figura 2).

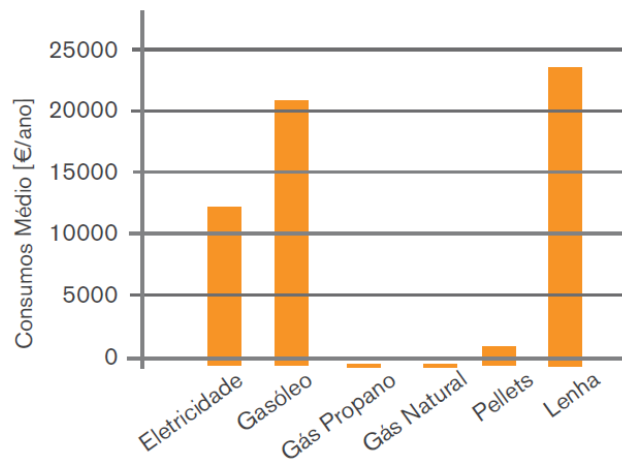


Figura 2- Consumo médio por fonte de energia [€/ano] Fonte: [2]

Sendo que cerca de 65% dos consumos gerados numa indústria panificadora/pastelaria advêm dos fornos de produção, como podemos verificar na Figura 3.

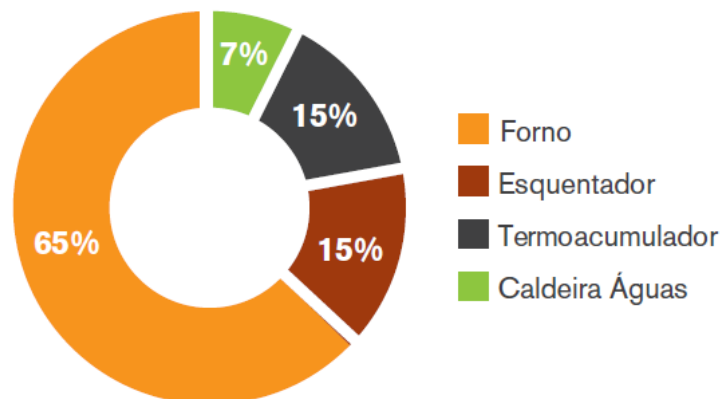


Figura 3 - Tipo de Gerador de calor Fonte: [2]

Já na Alemanha o consumo anual de energia na indústria alimentar ronda os 58Twh, dos quais 6 TWh são usados para a indústria pasteleira. [3].

Dentro da indústria pasteleira/panificadora o fabrico de pão é a que envolve um maior consumo energético com consumos médios estimados de 7MJ por Kg.

Uns estudos realizados aos consumos energéticos de uma indústria panificadora mostraram que 50% da energia consumida era utilizada pelos fornos de cozedura, mas apenas 1/3 era efetivamente energia útil utilizada no processo de cozedura, os restantes 2/3 era perdas energéticas. [4]

Depois de analisar estes dados percebemos que muitas das indústrias panificadoras ainda optam por usar fornos convencionais que recorrem ao uso de biocombustíveis, gás e outros. Este tipo de fornos apesar de se demonstrarem eficazes em pleno funcionamento necessitam de um longo período de pré-aquecimento, gastando enormes quantidades de energia no decorrer deste processo, existindo assim sérias perdas de energia que desejo eliminar ao colmatar ao implementar esta nova tecnologia em fornos para este tipo de indústrias.

Os fornos elétricos apesar de terem uma menor expressão quando comparados com os restantes fornos que usam outras fontes de energia continuam a ocupar uma grande quota de mercado com tendência de crescimento curto/médio prazo.

Apesar do crescimento dos fornos elétricos na indústria panificadora os elevados custos da eletricidade ainda levantam muitas questões aos proprietários destas indústrias. A solução proposta neste projeto pretende ir de encontro às necessidades energéticas de uma indústria panificadora tendo sempre em conta o aspeto económico, fundamental numa indústria que ser quer lucrativa.

1.2 Objetivos

Um dos principais objetivos deste projeto é perceber se é viável do ponto de vista técnico e económico. implementar a tecnologia em estudo num forno industrial destinado à indústria panificadora, e perceber qual será o impacto no consumo energético consequente desta alteração de fonte calorífica quando comprado às atuais alternativas no mercado.

Para isso serão realizadas uma série de simulações em softwares Computational Fluid Dynamics - CFD para perceber o comportamento desta tecnologia, que dependendo dos resultados ditará o avanço ou não de um primeiro protótipo.

O segundo objetivo passa por perceber quais as etapas necessárias para a criação de uma patente de modo a ser uma opção sólida e credível para potenciais investidores/ compradores.

Será realizado um estudo de mercado para identificar patentes com o mesmo fim ou que usem a mesma tecnologia ainda que aplicadas a outras indústrias, e perceber no que diferem do projeto a desenvolver.

1.3 Estrutura do documento

O relatório encontra-se dividido em sete capítulos, incluindo o presente capítulo, apresentando-se estruturado da seguinte forma:

- O primeiro capítulo, denominado “Introdução” foi dividido em 3 subcapítulos, o primeiro “Motivação e Contexto” onde é feito uma breve contextualização do panorama energético/económico atual com especial incidência na indústria panificadora. No segundo subcapítulo intitulado “Objetivos” são explanados os principais objetivos propostos com a realização do projeto a implementar. O terceiro e presente subcapítulo é um breve resumo que permite uma abordagem global do documento, para a melhor compreensão do leitor;
- O segundo capítulo apresenta o enquadramento teórico onde se inserem o estado da arte do documento e onde são abordados conceitos teóricos fundamentais para a realização do projeto a implementar;
- O terceiro capítulo deste projeto, denominado “Dimensionamento/projeto” é o capítulo onde foram realizados os estudos para o tipo de tecnologia a implementar no projeto bem como toda a modelação e estudo dimensional do mesmo.
- No quarto capítulo é apresentado o estudo CFD realizado onde é possível comparar os resultados obtidos bem como as devidas conclusões. Também neste capítulo está presente um inventário com todas os componentes necessários para a realização do projeto bem como uma breve estimação dos custos do projeto;
- O quinto capítulo é apresentado um estudo económico com a comparação direta entre os custos de produção de um forno convencional versus custos de produção com a solução apresentada no presente projeto;
- No sexto capítulo é apresentado uma breve integração do projeto no âmbito do mestrado em que se insere onde são abordados temas como planos de manutenção do equipamento a desenvolver;
- Por fim, no sétimo capítulo é dada uma conclusão, onde são apresentadas as conclusões relativas ao projeto bem como propostas de melhoria para desenvolvimentos futuros.

2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 Estado da Arte

Com o tema eficiência energética cada vez mais presente na realidade das indústrias é importante que sejam adotadas medidas que conduzam a um melhor controlo de recursos energéticos. A indústria panificadora não é exceção, estão identificadas inúmeras perdas energéticas provenientes do processo de cozedura do pão.

Assim sendo, neste capítulo apresenta-se um resumo do que já foi realizado com a tecnologia infravermelha aplicada à indústria panificadora ou semelhantes.

C. Skjoldebrand e Claes Goran Andersson [5] apresentam um estudo que demonstra as vantagens decorrentes do uso de radiação infravermelha (IR) de ondas de curtas como técnica de aquecimento no cozimento de pão, como a alta eficiência de transferência de calor e capacidade de penetração, bem como a possibilidade de alterar a temperatura de funcionamento do forno de forma rápida. Neste estudo fizeram uma comparação entre um forno IR e um forno convencional.

O processo de cozedura no forno infravermelho foi separado em duas etapas, uma inicial onde o forno funcionava à potência total disponível (100%), e uma segunda etapa onde a potência podia variar entre os 50% e os 30%.

Com este método, os autores obtiveram resultados mais satisfatórios do que com um forno convencional reduzindo o tempo de cozedura de 17 minutos para 6 minutos, e com o produto final com um aspeto muito mais apetecível, devido à flexibilidade de ajuste de temperatura de maneira extremamente rápida e ao forte poder de penetração da radiação IR.

Yung Shin Shyu, Wen Chieh Sung, Ming Hsu Chang & Jean Yu Hwang [6] analisaram quatro produtos provenientes da indústria panificadora, o pão de forma, torradas, bolo inglês e pão de ló e realizaram um estudo comparativo onde uma amostra foi cozida num forno elétrico convencional e a segunda amostra cozida num forno com tecnologia infravermelha, percebendo assim os efeitos que provém da tecnologia na qualidade final dos produtos.

Queriam também com este estudo perceber se existiam alterações significativas quanto à textura, volume humidade e avaliação sensorial. Concluído o estudo retiraram algumas informações interessantes, a massa do bolo inglês cozida no forno IV aumentou em metade do tempo que no forno convencional, perceberam também que o pão de ló cozido em IV'S apresentava maior resistência à degradação do tempo.

Quanto aos aspetos analisados, concluíram que não existiam diferenças significativas, apenas tempos de cozedura mais reduzidos, mantendo se a qualidade dos produtos.

Apesar de os termos comparativos poderem ser um pouco subjetivos são um bom indicador de que a qualidade do produto não é afetada quando utilizada tecnologia infravermelha na indústria panificadora.

O aquecimento fornecido por IR apresenta inúmeras vantagens quando comparado com outras soluções convencionais como tempo de aquecimento reduzido, aquecimento uniforme ao longo de todo o corpo, perdas de qualidade do produto reduzidas e são substancialmente mais económicos e eficientes. [7]

Ao expor um objeto a radiação infravermelha, essa mesma radiação consegue ser absorvida por alimentos, algumas características do IR, como a eficiência comprimento de onda e refletividade, diferenciam este mecanismo de aquecimento dos restantes, o aquecimento por IR tem vindo a ganhar a popularidade na indústria alimentar com um elevado número de aplicações como desidratação, secagem e pasteurização. [8].

Vários estudos [9] [10] [11] demonstraram a influência positiva de radiação térmica no processo de confeção de produtos de panificação, com uma geral redução de potência requerida para o aquecimento e um melhor controlo de todo o processo de cozedura. De acordo com Krishnamurthy [12] o processo de cozedura pode beneficiar com o uso de tecnologia infravermelha, em especial radiação IR de ondas curtas, devido ao seu grande poder de penetração nos alimentos.

Ficou comprovado que o uso de radiação térmica diminui o tempo de cozedura, ao realizar um teste numa peça de pastelaria de cerca de 10cm (massa espalmada) a redução no tempo de cozedura foi cerca de 63%. [11].

Quanto à qualidade final do produto [11] perceberam que a camada exterior do pão cozinhado num forno a IR era ligeiramente mais reduzida à comparada com o pão cozido num forno convencional, algo a ter em atenção na etapa de projeção e seleção do tipo de elementos IR a implementar no forno.

Porém para alguns investigadores a opção da tecnologia infravermelha não é a escolha imediata quando se fala em inovação no ramo da panificação, embora a maioria reconheça as suas enormes potencialidades e vantagens face às atuais alternativas do mercado neste segmento industrial.

A eficiência do processo de cozedura pode ser substancialmente melhorada com a implementação de tecnologias que permitam mecanismos de transferência de calor mais eficientes que os fornos convencionais.

Assim aspetos como tempo total de cozedura, energia despendida e emissões resultantes podem ser drasticamente reduzidos. Tendo todos estes aspetos de carácter energético em foco, Jovicic apresentou um protótipo de forno [13], "Porous Volumetric Ceramic Burner", ou VCB que consistia num forno a combustão, onde uma mistura de ar e combustível entravam em combustão dentro das cavidades de um material poroso inerte [14].

Segundo os autores esta solução apresentava níveis de transferência de calor bastante elevados, com baixas emissões poluentes e temperaturas na ordem os 1000-1500°C com uma radiação térmica próxima dos níveis da radiação infravermelha.

Apesar desta tecnologia já ser utilizada na indústria do vidro, ainda não se conseguiu comprovar a sua eficácia na indústria alimentar.

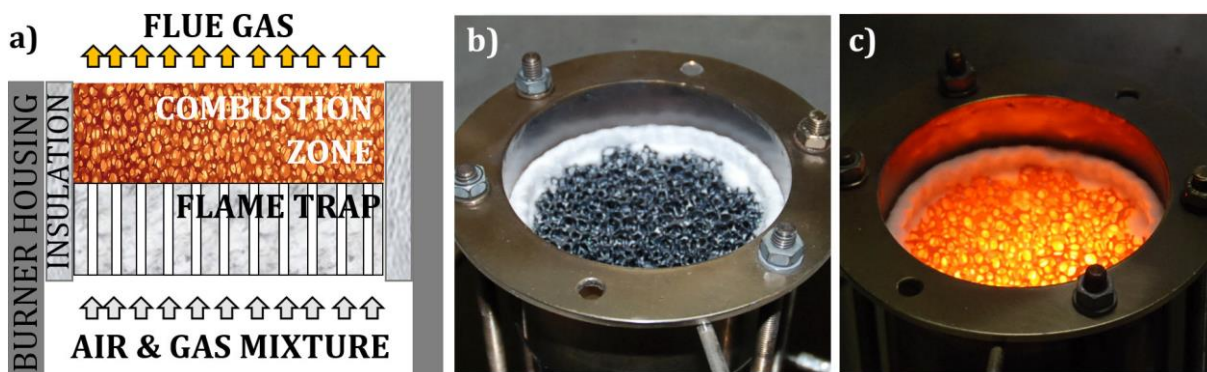


Figura 4 - Solução de Forno VCB apresentada por Jovicic, [14]

Os autores do documento [14] desenvolveram um forno baseado no tipo VCB apresentado em cima (Figura 4) e ilustrado na figura abaixo (Figura 5), este forno consiste em duas câmaras, uma (interior) onde os produtos de panificação podem ser colocados e uma câmara externa onde os VCB's porosos estão situados e onde direcionam o fluxo de gás resultante da combustão ao redor do forno e da câmara interna cozinhando os produtos diretamente através do teto da câmara que é feito de vidro de quartzo.

O gás resultante da combustão não entra em contacto direto com os produtos pois o gás flui através das paredes externas e aquece a câmara interior por convecção.

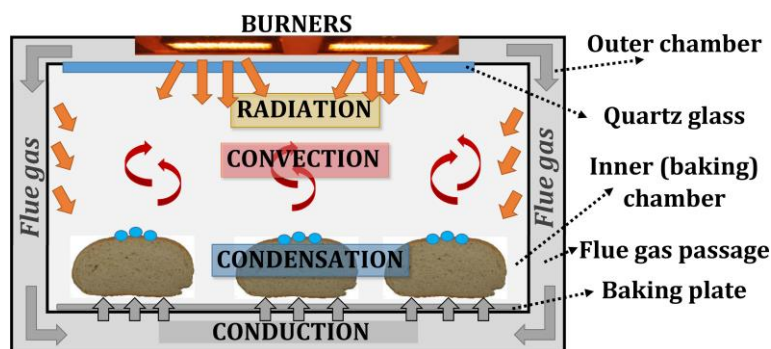


Figura 5 - Forno desenvolvido baseado no tipo VCB, [14]

Os testes foram realizados com pão branco com cerca de 800g (12 por fornada) e os obtidos demonstraram que o tempo de cozedura foi reduzido, o que por consequência reduziu também o consumo de combustível necessário, também a qualidade final do produto foi satisfatória com resultados muito idênticos aos convencionais fornos

elétricos. Apesar dos resultados francamente positivos, a solução acima ainda não apresenta os níveis de consumo energéticos desejados, nem o grau de eficiência esperados para um forno com uso exclusivo de tecnologia IR.

Luis Cavada e Alvaro Vallejo Noriega no decorrer do ano de 2005 apresentaram uma patente de um forno multifunções para tempos de cozedura reduzidos que usa tecnologia infravermelha [15], este forno utiliza radiações infravermelhas de diferentes comprimentos de onda para cozinhar uma maior variedade de produtos.

Ao analisar as alternativas disponíveis de mercado perceberam que existia uma lacuna, normalmente o consumidor via-se obrigado a escolher entre tempo de confeção e qualidade final do produto aquecido, de maneira a aquecer um alimento de maneira mais rápida que um forno convencional os consumidores aqueciam os alimentos em micro-ondas daí o grande monopólio criado por estes equipamentos em quase todas as casas dos consumidores, no entanto, os alimentos perdiam muita da humidade contida sacrificando assim o sabor.

Faltava preencher esta lacuna de tempos curtos de aquecimento juntamente com a manutenção da qualidade assegurada.

Assim os inventores desta patente criaram um forno com 3 gamas de comprimentos de onda infravermelhas de maneira a se adaptarem aos diversos alimentos. Apesar de serem bem-sucedidos na implementação da tecnologia, as resistências infravermelhas utilizadas na patente era tipo quartzo-tungsténio na ordem dos 1000W o que não vai de encontro aos valores energéticos esperados para este projeto, existindo aqui uma oportunidade de melhorar o sistema criado, utilizando tecnologia atualizada e, por conseguinte, mais eficiente.

Desta patente há a retirar alguns aspetos importantes e a ter em conta na conceção do projeto em desenvolvimento neste documento.

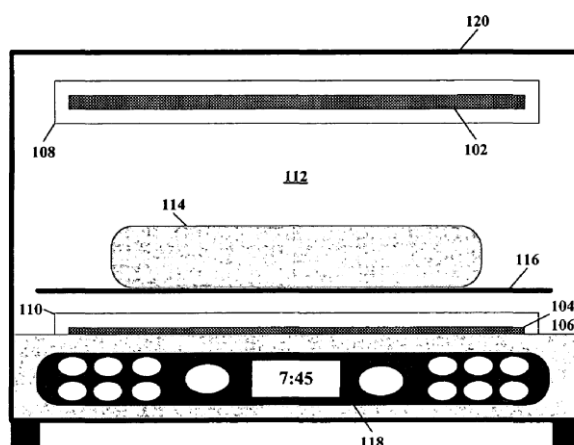


Figura 6 - Patente US 7,323,663 B2, [15]

2.1.1 Aplicações atuais de IR na indústria

Ao desenvolver um projeto com carácter inovativo e pioneiro é fundamental fazer uma pesquisa aprofundada sobre a tecnologia em estudo para assim perceber qual a posição atual que ocupa no mundo tecnológico e industrial. Por isso, pesquisar por aplicações atuais na indústria sobre a tecnologia em estudo é fulcral pois permite perceber o que já foi feito com a tecnologia e o potencial de inovação por descobrir.

Quando se pesquisa em aplicações de aquecimento infravermelho na indústria existe já uma grande quantidade de indústrias a fazer o uso desta tecnologia, principalmente indústrias automotivas e termoformagem, devido à alta eficiência desta tecnologia, os IR são cada vez mais uma aposta nas grandes indústrias permitindo otimizar processos e controlando custos.

Existem vários fabricantes a produzir módulos de aquecimento recorrendo a esta tecnologia como é o caso da francesa ECM technologies que apresenta soluções para recozimento, a italiana Comec, ou a Vogamakina que dispõem de tecnologias infravermelhas para a secagem de componentes após pintura.

Ao longo deste documento irei me focar essencialmente no fabricante Ceramicx não só pela variedade de opções disponíveis no que toca à tecnologia IR, mas também por toda a documentação técnica que disponibilizam.

No documento disponibilizado pelo fabricante “Infrared Solutions Case Studies” [16], pode-se analisar o portefólio de sistemas de aquecimento criados para satisfazer as necessidades dos clientes, clientes esses que são principalmente indústrias aeroespacial, automóvel, construção e indústrias de embalagem.

No que diz respeito ao uso de elementos cerâmicos o fabricante apresenta exemplos de clientes na área da termoformagem onde implementaram um sistema de IR numa das máquinas de prensagem já existente da empresa LinPac Packagin, e num estudo independente realizado pelo Dr. Robin Kent por comparação direta com a tecnologia até ao momento empregue, onde obtiveram uma poupança de 40% de energia.

Também ao nível da indústria do cimento a tecnologia IR cerâmica tem tido bastante adesão, com a fabricante de betuminosos Swiss Industrial a solicitar um sistema de secagem rápida de tubos de cimento recorrendo à tecnologia infravermelha, sendo desenvolvida uma solução octagonal com resistências de onda longa do tipo FTE (Full Tungsten Element) white com resultados muito favoráveis face às atuais alternativas, devido ao rápido aquecimento e elevada penetração da radiação infravermelha.

Um caso bastante interessante trazido pela Ceramicx foi um projeto desenvolvido junta da empresa *SANTA FE CUSTOM SKYLIGHTS*, esta empresa dedicada à termoformagem de componentes plásticos necessitava de uma solução de

aquecimento que fosse produtiva e eficiente de maneira a ser suportada pela rede elétrica local.

Este fabricante após realizar um estudo reparou que muita da energia fornecida pela alternativa atual apenas uma pequena percentagem da energia gasta produzia calor na peça a formar, existindo assim muitas perdas por convecção. A ceramicx produziu um sistema com resistências cerâmicas FTE (Full Tungsten Element) que permitiram direcionar com precisão o foco de calor para a peça a formar, obtendo assim resultados bastante satisfatórios graças à capacidade de penetração da radiação, mas também da precisão direcional desta tecnologia.

Em declarações o proprietário da empresa afirmou que fiabilidade do sistema implementado era bastante superior aos sistemas usados no passado com tecnologia conventual assim como o tempo de produção tinha para 2/3 comparado com o sistema anterior e a redução energética que também implicou poupanças energéticas significativas.

Trouxe apenas dois dos muitos exemplos de projetos criados recorrendo à tecnologia infravermelha com elementos cerâmicos todos na área da indústria de injeção plástica, fornos de cura bem como indústria automóvel e aeroespacial, que podem ser consultados no documento disponibilizado.

Quanto à tecnologia infravermelha com elementos de quartzo e quartzo/tungsténio as aplicações desta tecnologia concentram se fundamentalmente nas indústrias do vidro, plásticos e automóvel em processos que requerem temperaturas extremamente elevadas como fabrico de chassis. Nos elementos que usam Quartzo/Halogéneo, existem exemplos de aplicação na indústria aeroespacial para processos de cura de componentes de alta resistência como a fibra de carbono.

2.1.2 Potencial de Inovação

O departamento de investigação da ceramicx existem atualmente alguns projetos de pesquisa a decorrer essencialmente focados nas indústrias do setor automóvel e aeroespacial, onde vão de encontro aos requisitos dos clientes. De relevo para este documento há a salientar um forno modular de teste para um fabricante chinês com uma série de tabuleiros cada um com tecnologia diferentes, ondas longas com elementos cerâmicos, ondas médias com elementos de quartzo e ondas curtas com elementos halogéneos permitindo assim uma comparação direta entre elemento de aquecimento e material a aquecer. [17]

No que toca ao mercado de soluções de aquecimento com tecnologia infravermelha, para a indústria alimentar, ou mais especificamente indústria pasteleira/panificação o cenário muda bastante. Existem atualmente algumas opções com uso de tecnologia infravermelha, como o Toshiba Digital Toaster que usa uma combinação de infravermelhos com elementos de convecção e outros com uma potência combinada

de 1700W e uma temperatura de operação a rondar os 220°C ou o forno da NuWave que apresenta características muito semelhantes. Apesar de estes dispositivos apresentarem resultados operacionais aceitáveis, a verdade é que o consumo energético deste tipo de aparelhos ainda é muito significativo e consequentemente as perdas energéticas deles resultante.

É nesta área que existe um enorme potencial de inovação por revelar, com a mais recente tecnologia infravermelha existe uma forte possibilidade de reduzir drasticamente os consumos energéticos, valores na ordem dos 70%, bem como no tempo total de cozedura dos alimentos, neste caso derivados da panificação.

Existe uma excelente oportunidade de implementação da tecnologia no mercado com características muito atrativas não só para os fabricantes, mas também para os consumidores finais dos produtos, com um dispositivo capaz de apresentar resultados igualmente satisfatórios com um consumo energético muito inferior às atuais alternativas bem como tempos de aquecimento muito mais curtos, evitando assim as habituais perdas energéticas resultado dos pré-aquecimentos até á temperatura de serviço.

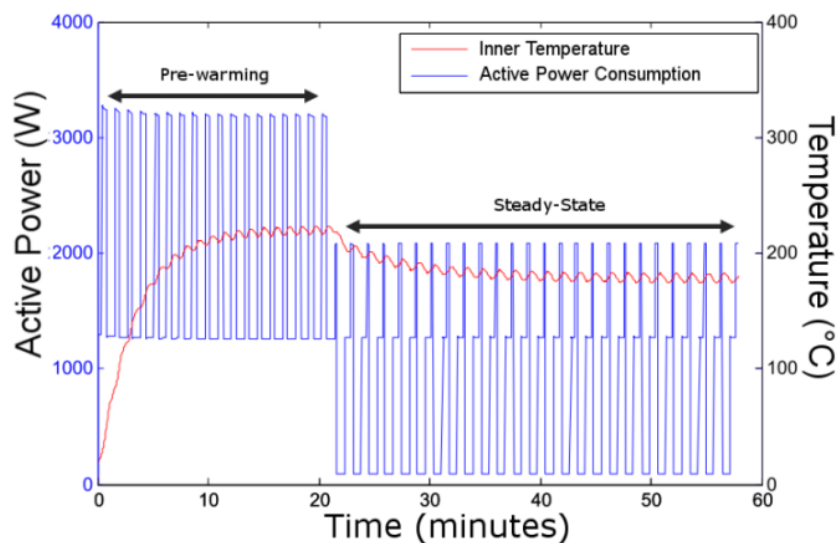


Figura 7 - Power consumption on a Electric Oven, [18]

Neste gráfico (Figura 7) disponibilizado no artigo “Residential Demand Management and distribution grid impact assessment” [18] é apresentado o consumo energético de um forno elétrico. Embora seja um forno elétrico de uso doméstico, consegue-se ter uma perceção onde se encontram os picos de consumo energéticos.

É durante a fase inicial, chamado, “pré-aquecimento” onde ocorre um maior consumo energético, assim tornar esta fase mais eficiente vai contribuir para uma otimização geral do consumo energético de um sistema de aquecimento.

2.2 Transferência de Calor

2.2.1 Princípios chave de aquecimento e transferência de calor

Muitos sistemas de engenharia são projetados para transportar fluidos de um lugar para outro, como um dado fluxo, velocidade ou até diferenças de altura especificadas e esses mesmo sistemas podem consumir trabalho mecânico, como numa turbina, ou produzir trabalho mecânico, como num ventilador. Esses sistemas não envolvem conversão da energia nuclear, química ou térmica em energia mecânica assim, seguindo o mesmo raciocínio, não há transferência de calor em quantidades significativas. Energia pode cruzar a fronteira de um sistema fechado de três formas diferentes: calor e trabalho.

2.2.1.1 Definições

Calor é definido como a forma de energia transferida entre dois sistemas, ou entre um sistema e o meio que o rodeia, também chamado de vizinhança, em virtude da diferença de temperaturas assim, uma interação de energia só é calor se ocorrer devido a uma diferença de temperatura. A diferença de temperatura pode também ser definida pela força motriz da transferência de calor, quanto maior a diferença de temperatura, maior a taxa de transferência de calor.

2.2.1.2 Leis Fundamentais

Para melhor perceber o fenômeno por de trás da transferência de calor, é essencial perceber as leis que servem de base à ciência que estuda o comportamento dinâmico dos fluidos, termodinâmica, leis essas que são apelidadas por Leis Fundamentais da Termodinâmica, que se podem dividir em 3 leis mais uma denominada como lei 0 introduzida posteriormente na comunidade científica e que serve de base às restantes daí ser considerada a lei “0”.

- **Primeira Lei da Termodinâmica** – trata do princípio da conservação da energia, de forma quantitativa, ou seja, num determinado processo termodinâmico a energia total é conservada de maneira que a variação de energia interna (ΔU) de um sistema é a diferença entre o calor (Q) trocado com o meio e o trabalho realizado pelo sistema na vizinhança, ou como mais comumente enunciada num sistema a energia não se cria nem destrói apenas se transforma, traduzindo-se pela seguinte equação (Eq.1):

$$\Delta U = Q - T \quad (\text{Eq. 1})$$

- **Segunda Lei da Termodinâmica** - A segunda lei da termodinâmica realiza uma análise qualitativa do processo termodinâmico, esta tem lei tem como princípio que o calor jamais fluirá de um corpo frio para um corpo quente, a não ser que ocorra trabalho (W). E que nem todo o calor produzido será convertido em trabalho, uma percentagem dessa energia será perdida decorrente da utilização de uma máquina térmica, como um forno. Assim esta segunda lei comprova que a entropia dos sistemas que nos rodeiam aumenta sempre sendo impossível atingir o zero absoluto.
- **Terceira Lei da Termodinâmica** – Esta lei define que numa escala absoluta de temperatura cujo mínimo é o 0 absoluto, a entropia de todas as substâncias é a mesma.
- **Lei Zero da Termodinâmica** – Esta lei diz que existindo dois sistemas que estão em equilíbrio térmico com um terceiro sistema, então estes dois sistemas estarão em equilíbrio térmico entre si.

2.2.2 Métodos de transferência de calor

O calor é transferido por meio de três mecanismos: **condução, convecção e radiação**. A Condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as partículas menos energéticas como resultado da interação entre as partículas. A convecção é a transferência de energia entre uma superfície sólida e o fluido adjacente que está em movimento e envolve os efeitos combinados da condução e do movimento do fluido. A radiação é a transferência de energia devido à emissão de ondas eletromagnéticas, esta última será o mecanismo de transferência de calor mais estudado ao longo deste documento devido ao facto de ser o mecanismo de transferência de calor empregue no forno a desenvolver.

- **Radiação** – é realizado sem contacto assim, não requer meio para a transferência de calor. A radiação é o mecanismo de transferência de calor por ondas eletromagnéticas produzidas por objetos devido à sua temperatura. Desta maneira quanto maior for a temperatura de um objeto, maior será a radiação que este emitirá, radiação que neste caso, será térmica. A transferência de calor radiante acontece quando a radiação emitida atinge o corpo a aquecer e é absorvida pelo mesmo.

2.2.3 Calor Infravermelho (IR)

Como já abordado neste documento a radiação infravermelha é uma onda eletromagnética que não requer um meio para a transferência de calor. Infravermelho

é a radiação eletromagnética na faixa de comprimento de onda na ordem de 0.78µm e 1000µm.

A radiação de comprimentos de onda mais curtos é mais energética e contém mais energia térmica, como demonstrado no diagrama abaixo (Figura 8) onde se pode observar a relação entre comprimento de onda e frequência. [19]

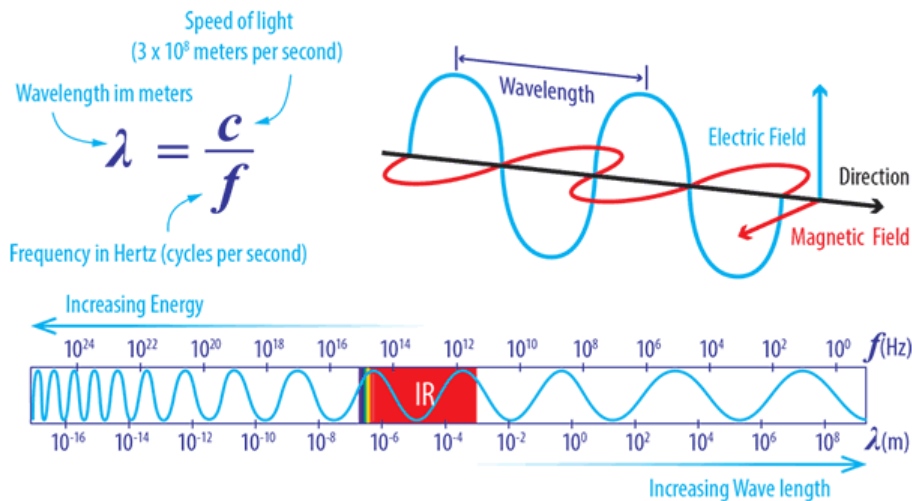


Figura 8 - Relação entre comprimento de onda e frequência em IR, [19]

Um emissor de radiação de IR pode emitir radiação em todas as direções, assim é importante projetar e um emissor corretamente.

Todas as emissões IR são refletidas, absorvidas ou transmitidas e existe uma relação aritmética que relaciona estes três fatores que totalizam 1 ou 100%, à totalidade desta ligação denomina-se por corpo negro, uma entidade física ideal que absorve toda a radiação eletromagnética. (Figura 9)

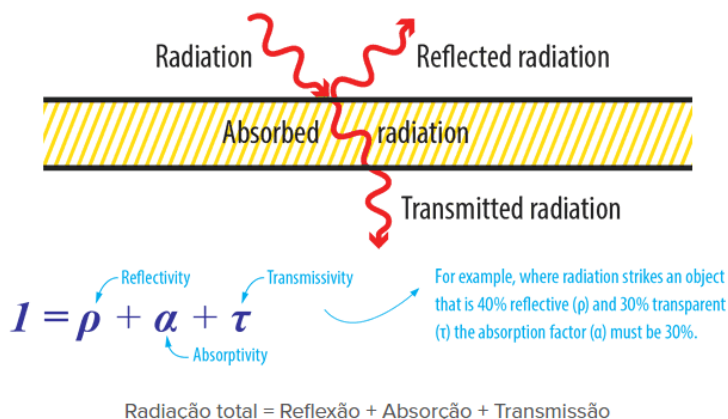


Figura 9 - Diagrama de radiação, [19]

2.2.3.1 Leis fundamentais do aquecimento infravermelho.

O calor infravermelho, medido em Joules (J) é produzido através de diferenças de temperaturas entre objetos, qualquer objeto a uma temperatura superior a 0k (-273.15°C) irradia energia infravermelha e, quando um objeto é mais quente que o outro, a energia infravermelha flui do objeto mais quente para o objeto mais frio. A superfície dos objetos terá um papel fundamental tanto na emissão da energia infravermelha quanto na observação da energia emitida.

Como já referido o calor infravermelho é uma onda eletromagnética e uma vez que é usada para fins industriais é importante perceber as principais formas de disponibilização dessa radiação.

As ondas eletromagnéticas provenientes do calor infravermelho dividem-se em três gamas de ondas separadas por comprimentos de onda (Figura 10):

- Ondas curtas (0.78 - 1.4 μm)
- Ondas médias (1.4 - 3 μm)
- Ondas longas (3 - 1000 μm)

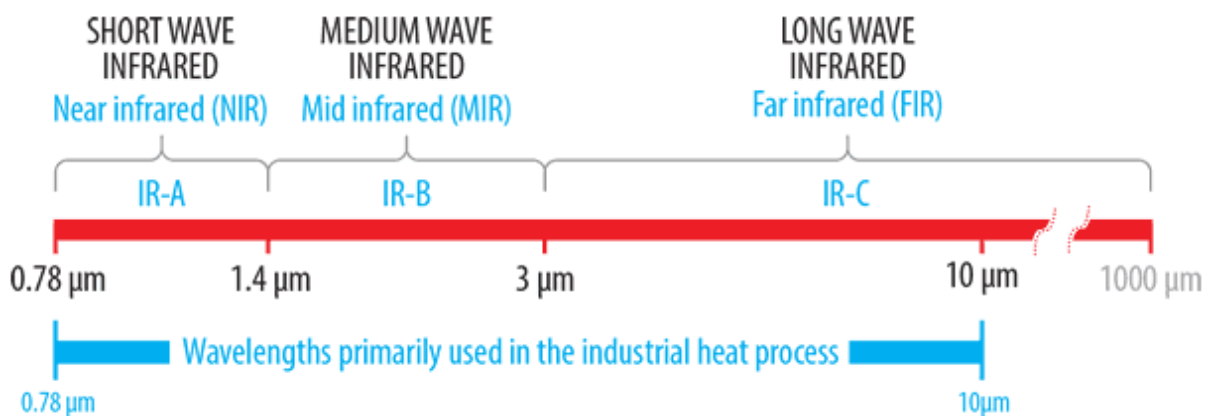


Figura 10 - Gama de comprimentos de onda em IR, [19]

A potência de aquecimento gerado é normalmente medida em Watts (W) e é definida por Joule/segundo. O fluxo de calor (Φ_q) é definido como potência de aquecimento por unidade de área e é medido em W/m^2 ou W/cm^2 .

2.2.3.2 Aplicações do aquecimento IR a materiais

O uso de tecnologia de IR para fins de aquecimento na indústria é cada vez mais frequente, desde curar compósitos, formar componentes automóveis, secagem de betuminosos, termoformagem de embalagens de alimentos ou até testagem de escudos térmicos na indústria aeroespacial, são apenas algumas das aplicações atuais desta tecnologia.

A gama de elementos de aquecimento é extensa e com características que diferem bastante entre si assim, é importante selecionar o elemento de aquecimento apropriado bem como os tipos de refletor de maneira a projetar uma solução de aquecimento eficiente e produtiva.

Uma empresa fornecedora de resistências com esta tecnologia a “Ceramicx Solutions” apresentou ilustrações (Figura 11) onde demonstram as diferentes soluções de saída de radiação que os seus produtos disponibilizam.

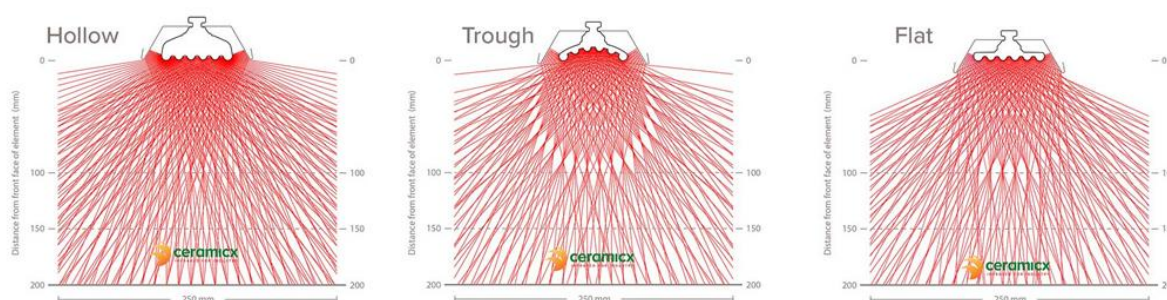


Figura 11- Tipos de saída de radiação IR (Ceramicx), [19]

As ondas infravermelhas apresentam comportamentos diferentes consoante a variação do seu comprimento de onda, em comprimentos de onda mais longos, a quantidade de energia transferida é menor devido às temperaturas mais baixas do emissor, assim, os tempos de aquecimento são normalmente mais longos. **Quanto menor o comprimento de onda, maior a temperatura do emissor e a potência infravermelha disponível aumenta rapidamente.**

Ao selecionar um emissor infravermelho para uma tarefa de aquecimento específica devem se ter em conta as características de absorção do material a aquecer. As frequências infravermelhas emitidas e as frequências de absorção do material alvo devem corresponder para permitir a transferência de calor com a máxima eficiência.

Alguns materiais irão absorver radiação com maior facilidade usando cerâmica, outros a alta intensidade de um aquecedor infravermelho de halogéneo outros ainda a intensidade média fornecida por um aquecedor de quartzo. Assim é extremamente importante fazer uma seleção correta do tipo de tecnologia a usar para o forno a

desenvolver ao longo deste documento, seleção essa que será realizada e analisada mais à frente neste documento.

2.3 A Tecnologia Infravermelha no aquecimento Industrial

Os emissores infravermelhos usados na indústria têm por norma um comprimento de onda na faixa de 0.75 a 10 μ m. Nesta gama de comprimentos de ondas podemos encontrar três divisões, divisões essas que são, ondas curtas, médias e longas. No diagrama abaixo disponibilizado pela empresa ceramicx é possível observar a distinção entre as três gamas de comprimentos de ondas correspondentes aos três tipos de materiais utilizados, cerâmico, halogéneo e quartzo.

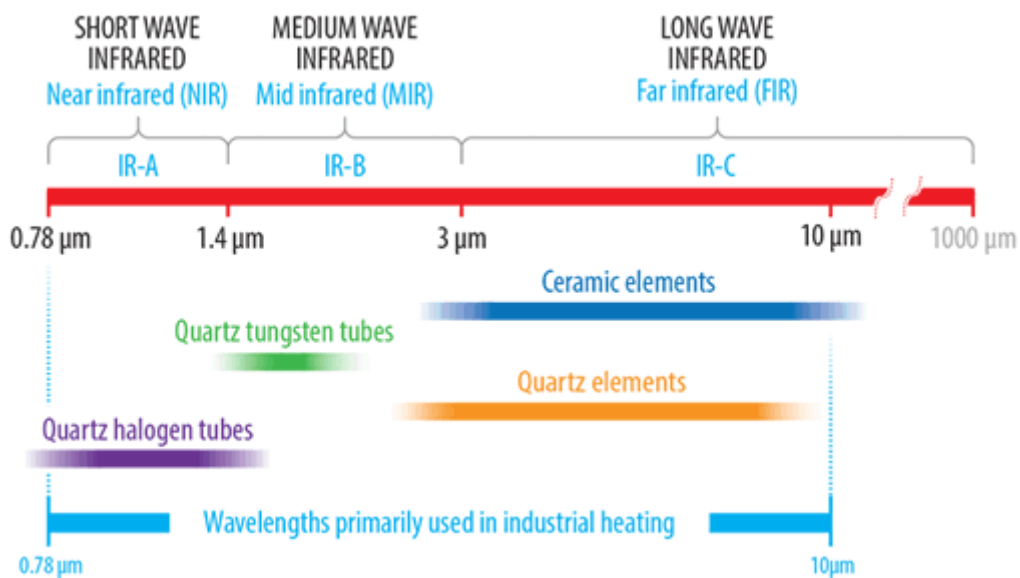


Figura 12 - Comprimento de onda IR, [19]

- **Emissores de ondas longas** – estes emissores têm uma faixa de emissão de pico que ronda os 3-10 μ m, geralmente este tipo de ondas está associado a emissores cerâmicos, constituídos por uma bobina com resistência a altas temperaturas inserida num corpo cerâmico com propriedades altamente emissivas. Estes tipos de emissor são fabricados em diversos tamanhos e com superfícies planas ou curvas.
- **Emissores de ondas médias** – estes emissores apresentam uma faixa de emissão de pico entre 1.4-3 μ m, aqui podem se encontrar dois tipos de emissor diferentes na extremidade mais curta da faixa encontra-se a janela de operação típica de um elemento de tungstênio de quartzo, que consiste num tubo de quartzo transparente linear selado onde se encontra uma bobina de tungstênio, este tipo de elemento é caracterizado por ter um tempo de resposta rápido com baixa inércia térmica. Já extremidade oposta da faixa

- **Emissores de ondas curtas** – estes emissores com valores a rondar comprimentos de onda de 0.78 – 1.4µm são fundamentalmente característicos de elementos de halogéneo de quartzo, a sua construção é semelhante à do emissor de tungsténio de onda média, mas neste tipo de elemento existe uma bobina redonda de tungsténio e os tubos circundantes são de quartzo preenchidos com gás halogéneo. Este tipo de emissor é característico por apresentar uma luz branca resultado da temperatura mais alta da bobina.

2.3.1 Elementos de Aquecimento infravermelho.

A gama de elementos aquecedores infravermelhos é extensa, com uma gama ampla de comprimentos de onda o que permite uma enorme aplicabilidade em processos comerciais e industriais, assim é de extrema importância fazer uma correta seleção e dimensionamento do elemento de aquecimento que melhor que se adequa aos resultados que se pretendem obter.

2.3.1.1 Elementos cerâmicos

Esta solução de aquecimento é altamente eficaz em aplicações de calor, como embalagem, termoformagem, recozimento, processos de cura, impressão ou secagem de tinta.

A gama da ceramicx, fabricante no qual me irei basear para o desenvolvimento deste documento apresenta várias versões no que toca a este tipo de elemento IR:

- Elementos de calha: QCE, QTE, HTE, ETI.

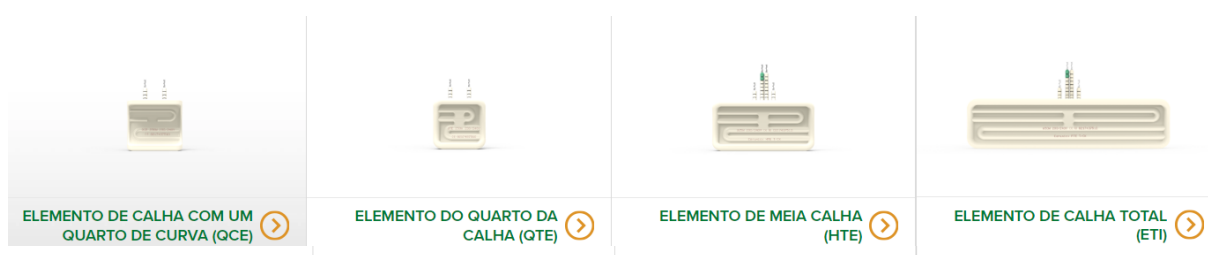


Figura 13 - Elementos cerâmicos (Ceramicx), [19]

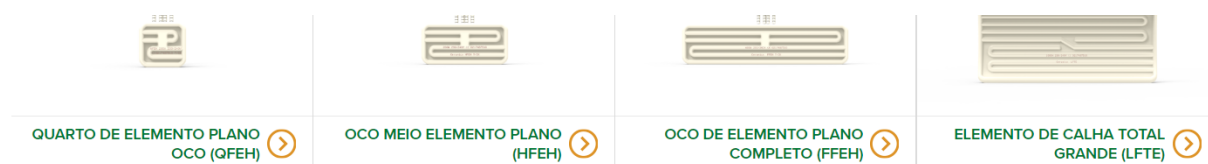


Figura 14 - Elementos cerâmicos de Plano (Ceramicx), [19]

Este tipo de elementos consiste numa liga resistente a elevadas temperaturas incorporada num corpo cerâmico. Cada elemento produz temperaturas de operação

na ordem dos 750°C, com uma saída de potência a variar entre os 60W e os 1000W (FTE) e comprimentos de onda na faixa de 2 - 10µm.

2.3.1.2 Elementos de Quartzo

Este tipo de elemento (Figura15) fornece uma resposta instantânea ao calor solicitado, sendo por isso bastante requisitado para uma diversidade de inúmeros processos industriais. Quando comparado com os elementos cerâmicos analisados anteriormente, os elementos de quartzo demoram muito menos tempo a aquecer, atingindo o pico de funcionamento numa questão de segundos. Estes elementos à semelhança dos cerâmicos apresentam uma temperatura máxima de funcionamento de 750°C com comprimentos de onda na faixa 1.5 – 8µm e com potências padrão a variar entre os 150 W e os 1000 W.



Figura 15 - Elementos de Quartzo (Ceramicx), [19]

2.3.1.3 Elementos de Tungsténio/ Halogéneo

Estes emissores (Figura 16) caracterizados por apresentarem comprimentos de onda na gama das ondas curtas são o elemento que fornece as temperaturas mais altas, sendo principalmente aplicados na indústria da cura da tinta e indústria automotiva, bem como aeroespacial para efeitos de simulação, simulando o calor extremo da reentrada na atmosfera terrestre.

De resposta rápida estes elementos são bastantes poderosos oferecendo uma resposta rápida, com um tempo de aquecimento até à temperatura máxima de funcionamento no intervalo de tempo de segundos. Um elemento de tungsténio com uma potência aproximada de 1000 W atinge temperaturas a rondar os 1500°C em cerca de 6 segundos.



Figura 16 - Elementos de Halogéneo (Ceramicx), [19]

2.3.2 Aplicação das diversas tecnologias de Aquecimento Infravermelho.

A tecnologia infravermelha dispõe de variadas gamas de funcionamento assim, selecionar a tecnologia mais adequada para o tipo de material a aquecer torna-se essencial para o fabrico e conceção de um sistema eficiente e produtivo.

Nas figuras abaixo (Figura 17 e Figura 18) encontra-se um diagrama de quais as gamas de ondas dentro do espectro da radiação infravermelha mais adequadas a cada tipo de material, com base na sua densidade e condutividade térmica.

pintar

	Onda curta	Onda Média	Onda longa
Painéis de aço para secagem de tinta - acrílico		✓	✓
Painéis de aço para secagem de tinta - Alkyd		✓	✓
Painéis de aço para secagem de tinta - epóxi		✓	✓
Verniz Epóxi	✓	✓	

Adesivos

	Onda curta	Onda Média	Onda longa
A base de água	✓	✓	
Polimerização final	✓		
etiquetas de papel			✓
Revestimento de cola em papel			✓

Figura 17 - Tabela Ceramicx aplicabilidades, [19]

Plásticos

	Onda curta	Onda Média	Onda longa
Pasta de PVC		✓	✓
Formação de ABS		✓	✓
Formação de poliestireno		✓	✓
Formação de polietileno		✓	✓
Formação de polipropileno		✓	✓
Carroçarias		✓	
Pré-conquista	✓		
Tinta em pó	✓		
Encolhimento do PVC		✓	✓

Alimentos

	Onda curta	Onda Média	Onda longa
Pasteurização / Esterilização	✓		
Estabilização Térmica	✓		
Roasting		✓	✓

Têxteis

	Onda curta	Onda Média	Onda longa
Tapete de apoio em látex			✓
Tapete de apoio em PVC			✓

Serigrafia

	Onda curta	Onda Média	Onda longa
Camisetas estampadas em tela		✓	✓
Transferências de ajuste de calor			✓
Mostradores de instrumentos de plástico			✓
Painéis de alumínio da fâscia		✓	

Figura 18- Tabela Ceramicx aplicabilidades parte 2, [19]

2.3.3 Considerações acerca da tecnologia.

A aplicabilidade desta tecnologia é variada, existindo uma enorme variedade de elementos disponíveis adequados aos mais diversos processos e indústrias, daí a sua análise e compreensão sejam fundamentais para um sistema o mais eficiente e produtivo possível, desde a compreensão das gamas de operabilidade, às potências necessárias até às dimensões do elemento a selecionar. A ceramicx dispõe de um catálogo extenso com opções ajustadas a todas as possibilidades, assim ao longo dos capítulos seguintes será feito um estudo de qual a melhor opção a utilizar no forno que se pretende desenvolver, analisando as características técnicas das várias opções disponíveis do fabricante.

2.4 Fornos Infravermelhos

A radiação infravermelha é usada para penetrar nos alimentos, assim como a radiação de micro-ondas num forno de micro-ondas. A radiação infravermelha começa a cozinhar o interior dos alimentos mais rapidamente do que nas técnicas de cozimento tradicionais, nas quais o calor tem que viajar do lado de fora dos alimentos para o centro. A transferência de calor em fornos de panificação depende de inúmeros parâmetros como o formato do forno, o material, o tipo de elemento IR, o alimento destinado a cozer.

Aplicação de fornos que usem exclusivamente a tecnologia IR na indústria panificadora é ainda muito reduzida e praticamente inexistente. Um forno infravermelho usa radiação infravermelha em substituição do aquecimento tradicional por condução ou convecção. Um forno infravermelho pode ter dimensões compactas e permite “cozinhar” produtos industriais para aplicar revestimentos, curar e secar materiais ou para outros usos semelhantes em aplicações industriais comerciais.

Um dos usos mais comuns dos fornos infravermelhos é como dispositivo de cozinha doméstica que auxiliado por mecanismos de convecção e condução permite cozinhar alimentos mais rapidamente que outros fornos. Muito parecido com a radiação de micro-ondas a radiação infravermelha pode ser usada para cozinhar alimentos de dentro para fora, permitindo um aquecimento e cozimento mais rápidos

Para usos comerciais e industriais, um forno infravermelho normalmente refere-se a um grande dispositivo no qual os produtos são frequentemente colocados para aquecimento. Esse aquecimento geralmente é feito para cozer em revestimentos, produtos laminados, revestimentos de queima, encolher e secar diferentes materiais. Os fornos infravermelhos com esse tipo de capacidade geralmente permitem um aquecimento muito rápido e preciso e podem exigir menos energia do que outros tipos

de fornos. Embora este tipo de forno custe normalmente o mesmo que os fornos industriais convencionais, as peças individuais para substituição podem ser mais caras.

2.5 IR no cozimento de Pão.

O efeito da radiação IR nas propriedades químicas e físicas dos alimentos a aquecer é crucial para o correto desenho de um forno infravermelho e otimização dos processos térmicos nele existentes.

De maneira geral as substâncias alimentares absorvem radiação infravermelha mais eficientemente através do mecanismo da alteração do estado vibracional molecular. A água e outros componentes orgânicos como as proteínas e os amidos absorvem radiação IR para comprimentos de onda na ordem dos 2.5µm. [20].

Na Tabela 1 [7] é possível observar as variações das taxas de absorção para os diferentes componentes constituintes alimentares.

Chemical group	Absorption wavelength (µm)	Relevant food component
Hydroxyl group (O-H)	2.7 to 3.3	Water, sugars
Aliphatic carbon-hydrogen bond	3.25 to 3.7	Lipids, sugars, proteins
Carbonyl group (C=O) (ester)	5.71 to 5.76	Lipids
Carbonyl group (C=O) (amide)	5.92	Proteins
Nitrogen-hydrogen group (-NH-)	2.83 to 3.33	Proteins
Carbon-carbon double bond (C=C)	4.44 to 4.76	Unsaturated lipids

(Source: Rosenthal, 1992)

Tabela 1 -The infrared absorption bands for chemical groups and relevant food components [7]

Sakai e Hanzawa [8] reportaram que a penetração de ondas longas não afetava a distribuição da temperatura dentro dos alimentos, indicaram também que as ondas IR longas penetraram muito pouco o alimento a aquecer, com quase toda a energia a dissipar-se pelo exterior do alimento, resultados consistentes com outros estudos realizados.

Com os resultados obtidos, conclui-se que ondas longas IR não apresentam o espectro de comprimentos de onda mais apropriados às taxas de absorção dos alimentos, o que vai de encontro com o estudo elaborado por C.

Skjoldebrand e Claes Goran Andersson [5] que demonstra as vantagens decorrentes do uso de radiação infravermelha de ondas de curtas como técnica de aquecimento no cozimento de pão, como a alta eficiência de transferência de calor e capacidade de penetração.

Na Tabela 2 [7] apresentada em baixo é possível observar a intensidade da penetração de ondas curtas em vários alimentos.

Product	Spectral peak (μm)	Depth of penetration (mm)
Dough, wheat	1.0	4 to 6
Bread, wheat	1.0	11 to 12
Bread, biscuit, dried	1.0	4
	0.88	12
Grain, wheat	1.0	2
Carrots	1.0	1.5
Tomato paste, 70% to 85% water	1.0	1
Raw potatoes	1.0	6
Dry potatoes	0.88	15 to 18
Raw apples	1.16	4.1
	1.65	5.9
	2.36	7.4

Tabela 2 - Intensidade da penetração de ondas curtas em Alimentos, [7]

Analisando a Tabela 2 constata-se que o espectro de radiação IR indicado para o cozimento do pão situa-se em 0.80-1 μm , com um pico de penetração até 12 mm.

2.5.1 Indústria panificadora – Cozimento do Pão.

Atualmente na indústria panificadora o tempo estimado para a cozedura de um pão de tamanho médio, cerca de 500g de farinha num forno convencional, é cerca de 40 minutos, sem incluir o tempo de pré-aquecimento (temperatura ambiente do forno – 250°C) a uma temperatura de +/- 250°C, parâmetros que variam de acordo com o tamanho e tipo de pão a cozer. [21]

Com a tecnologia a implementar estima-se que estes valores caiam significativamente para valores de tempos de cozedura completo, de +/- 8 minutos desde o instante em que a massa é colocada no forno e simultaneamente o mesmo é ligado à temperatura desejada.

3. DIMENSIONAMENTO / PROJETO

O correto dimensionamento de um qualquer equipamento industrial é fulcral para uma otimização e conseqüente rentabilidade do processo industrial a implementar, permitindo assim obter importantes ganhos energéticos. Um sistema corretamente dimensionado traduz-se num sistema eficiente onde as solicitações energéticas são asseguradas com o menor desperdício energético possível.

Ao longo deste capítulo será demonstrado todo o processo de dimensionamento do forno industrial, desde as dimensões gerais do forno, características dos materiais usadas na construção, quantidade e dimensões de elementos térmicos, entre outros aspetos relevantes para a modelação/construção deste sistema térmico.

3.1 Modelação do Forno Industrial

3.1.2 Dimensões Gerais do Forno

Nesta fase inicial de desenvolvimento do projeto, o forno foi pensado para ter uma dimensão mais reduzida, o que permite um melhor controlo de custos numa possível construção, sem comprometer a credibilidade/autenticidade dos resultados obtidos, recorrendo à correlação de dados.

Na imagem abaixo (Figura 19) é representada a primeira iteração do forno, com apenas dados estruturais, como dimensões gerais e formato.

O atual capítulo tem como objetivo dar a conhecer as características dimensionais do forno a ser projetado. Todos os renders apresentados ao longo deste capítulo e capítulos seguintes foram desenhados/projetados por mim no software de engenharia Solidworks Student Edition 2021, desde a estrutura do forno bem como todos os componentes nele integrantes.

O Forno projetado consiste numa estrutura de formato cúbico com 600mm de largura, 600mm de altura e 550mm de profundidade. As dimensões da moldura do forno situam-se em 90mm para o rebordo superior, 45mm para o rebordo inferior e 40mm para os rebordos laterais.

Sublinhamos que as dimensões atribuídas neste capítulo são meramente para efeitos de estudo dimensional e estrutural do forno, podendo existir iterações às dimensões e formato do forno.

De seguida apresento imagens ilustrativas (Figura 19 e Figura 20) do modelo 3D construído no solidworks.

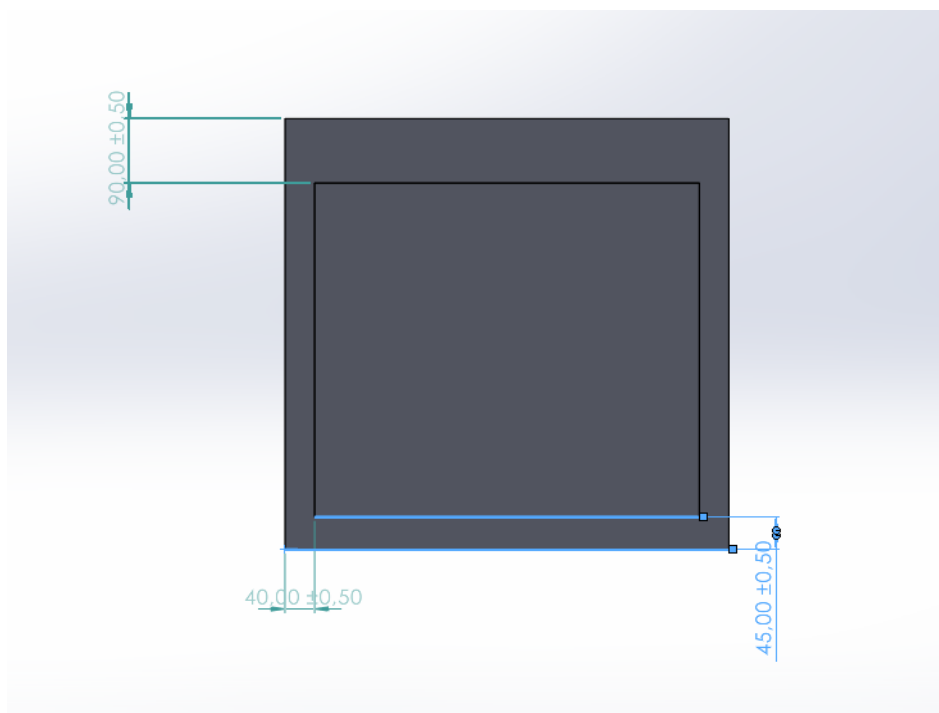
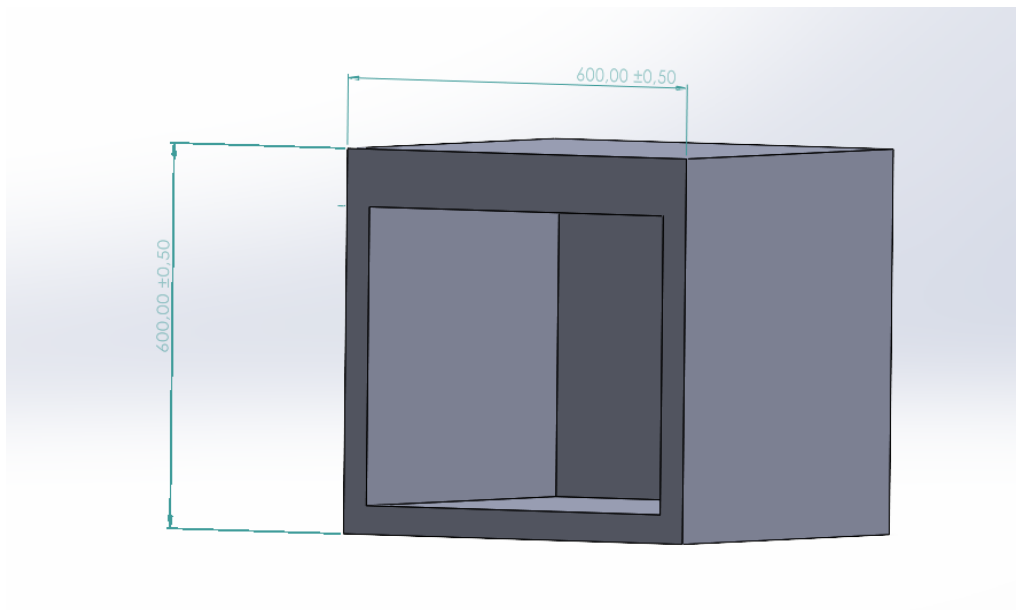


Figura 19 - Render Forno Solidworks 1

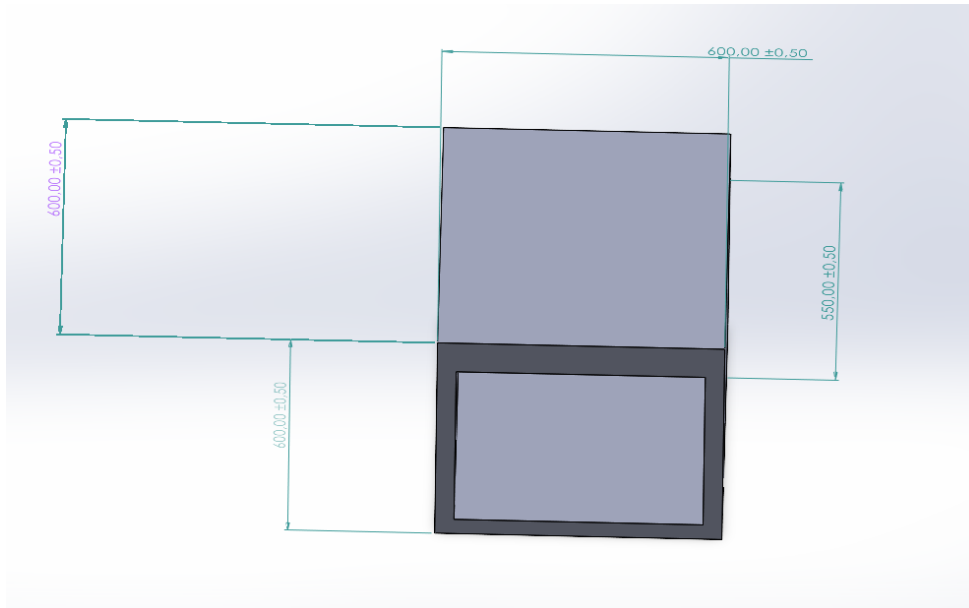


Figura 20 - Render Forno Solidworks 2

À estrutura principal do forno foi também adicionado uma porta de dobradiças com um recorte retangular para ser possível a observação do processo de cozedura sem ser necessário abrir a porta do forno, induzindo perdas energéticas desnecessárias (Figura 21).

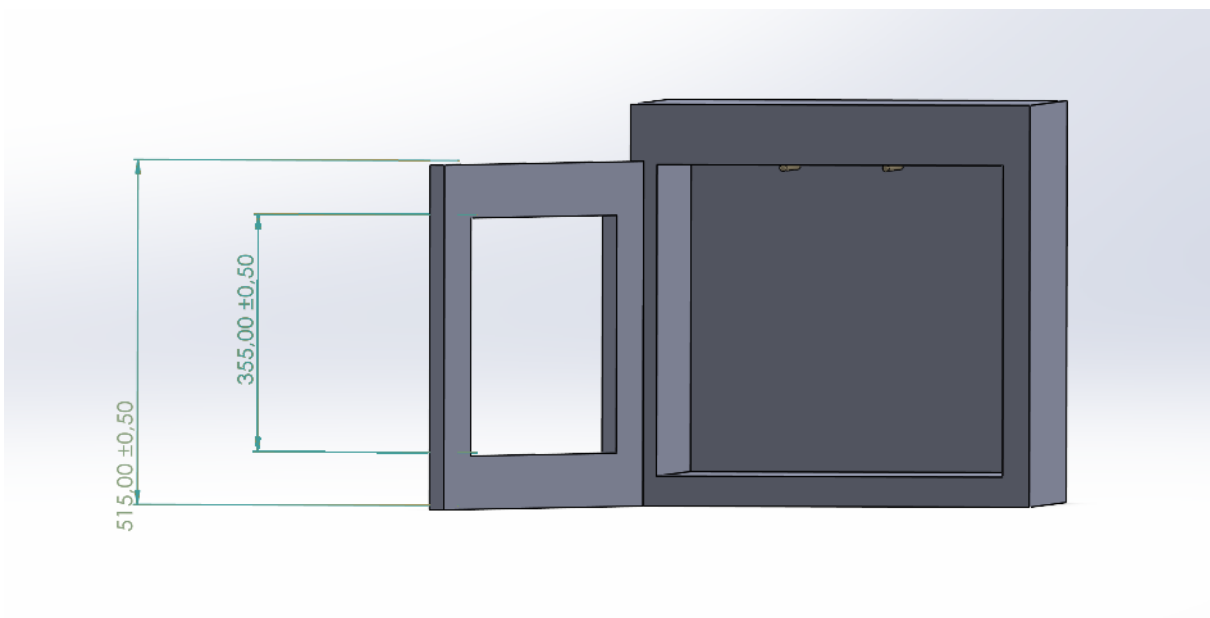


Figura 21 - Render forno Solidworks 3

3.2 Seleção dos elementos IR a utilizar.

De acordo com estudos demonstrados anteriormente, o processo de cozedura do pão recorrendo à tecnologia IR, é um processo bastante sensível que, devido à natureza dos constituintes do pão requer precisão no processo de cozedura para obtenção de bons resultados, assim é de elevada importância a seleção adequada do elemento IR a utilizar na construção do forno.

3.2.1 Aspetos gerais a considerar na seleção do elemento IR:

- Ondas curtas (de preferência espectro baixo da gama $0.7\mu\text{m} - 2.5\mu\text{m}$) [7]
- Menor consumo energético possível;
- Tempo de aquecimento até T_{max} inferior a 4 minutos;
- Temperatura máxima superior a 250°C ;
- Dimensões ajustadas à realidade dimensional do forno a construir;

Atualmente a ceramicx dispõe de várias alternativas na gama de elementos IR, desde elementos de quartzo, halogéneo/tungsténio e cerâmicos. Destes mencionados os existem duas opções que poderão ser viáveis para execução deste projeto, a primeira é utilizando elementos de halogéneo e a segunda usando elementos cerâmicos de quartzo

Ambas as opções selecionadas continuam a não ser as ideais para os objetivos pretendidos, assim realizei um estudo de caso para cada uma das opções, de maneira a perceber qual a mais indicada para o projeto, e, se possível otimizar a opção selecionada de maneira a ir encontro aos objetivos traçados para o projeto.

Estudo de Caso 1: Elemento de Quartzo Tungsténio/Halogéneo.

Este tipo de elementos Tungsténio/Halogéneo, tem como principais características temperaturas elevadas de funcionamento em pleno, ciclos de aquecimento/arrefecimento rápidos com um intervalo temporal de segundos e ainda comprimentos de onda na gama das ondas curtas que, para o projeto em causa é talvez o aspeto mais importante a ter em consideração, devido às propriedades biológicas do pão.

A ceramics, dispõem de dois tipos de elementos de Quartzo, de tungsténio e de halogéneo, que em termos dimensionais e potência energética necessária são equivalentes, diferindo apenas nas temperaturas máximas alcançadas, 1500°C para os elementos de tungsténio e 2600°C para os elementos de halogéneo. Outra característica que distingue estes dois tipos de elementos são a gama de comprimentos de onda, por eles emitida. Com valores na faixa dos 1.6 μm para elementos de tungsténio e 1 μm .

Para este primeiro estudo de caso, foi selecionado um elemento de IR de halogéneo, por ser o elemento que apresenta um menor comprimento de onda. Este elemento consiste num de filamento de halogéneo que, como referido anteriormente permite obter temperaturas na ordem dos 2600°C com comprimentos de onda na gama das ondas curtas com valores de comprimento de onda a rondar o 1 μm .

Apesar deste tipo de elementos apresentar características bastante relevantes para a indústria panificadora como, tempos de aquecimento rápidos e comprimentos de onda muito baixos a grande desvantagem deste tipo de elementos é o consumo associado aos mesmos, ao analisar o catálogo da Ceramics o elemento com menor potência denominado pelo fabricante como “QHS” ronda os 750W de consumo energético com temperaturas a alcançar os 1450°C.

Ao realizar um estudo de consumo energético, verifica-se que o objetivo da poupança energética pode ficar comprometido se não forem feitas alterações ao funcionamento e utilização deste elemento IR. Selecionado o exemplo com menor potência do catálogo da ceramics, verifica se que corresponde ao elemento já referido anteriormente pela abreviatura QHS, significado “Quartz Halogen Short” pode se fazer a seguinte análise teórica de consumos.

Para uma resistência QHS 750W, menor potência disponível dentro da gama de elementos de quartzo halogéneo, e para um ciclo de funcionamento esperado de +/- 10 minutos obtemos o seguinte consumo energético.

Consumo = Potência * Tempo de funcionamento. (2)

Considerando um forno com duas resistências de 750W com uma potência combinada de 1500W e um período de funcionamento necessário estimado de 10 minutos por operação (fornada), o consumo por operação seria cerca de 0,250 kW/h.

Uma vez que:

Tempo necessário estimado: 10 minutos correspondem a 0.1667 horas

$$(1500 \times 0.1667) / 1000 = 0.250 \text{ kWh}$$

Comparando estes valores com os de um forno convencional a gás ou elétrico (+/- 2000W), o consumo energético é ligeiramente inferior para o mesmo período de tempo, sendo que o consumo médio para um forno na indústria panificadora, numa operação com 800g a 30 min é cerca de 1kWh. [22]

Um aspeto a ter em conta são as temperaturas de operação deste tipo de elemento, como analisado anteriormente as resistências do tipo quartzo/halogéneo alcançam temperaturas na casa dos 2600°C. Como visto anteriormente, o processo de cozedura do pão, dependendo dos constituintes e do tipo de pão, apresenta temperaturas de 250°C com tempos de cozedura até 40min.

Rapidamente se conclui que o elemento selecionado está sobredimensionado para o tipo de operação a realizar, existindo alguns desperdícios energéticos que quando eliminados representam poupanças significativas no consumo energético do forno a projetar.

Assim, de maneira a otimizar a operação seria necessário utilizar um controlador de potência de maneira a obter a gama de temperaturas necessárias para completar a operação.

Estes elementos, também denominados por QHS, tem formato cilíndrico com dimensões bastante compactas que se adequam perfeitamente ao protótipo de forno a projetar. Um QHS possui cerca de 224mm de comprimento a frio e 170mm quando à temperatura máxima, possuindo cerca de 10mm de diâmetro a frio e 7,2mm à temperatura de funcionamento.

QHS Quartz Halogen Short,

Standard Wattage 750W . Standard Voltage 240V.

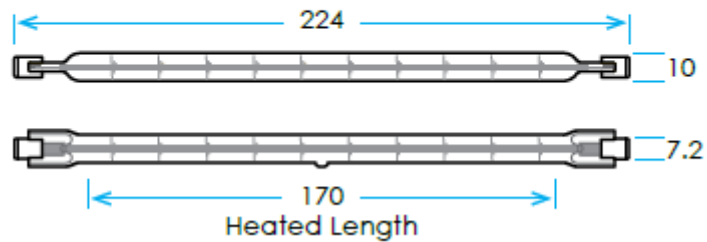


Figura 22 - Diagrama dimensional da QHS, Fonte: [19]

A ceramicx dispõem ainda vários diâmetros para este tipo de elemento IR, com os tubos singulares com cerca de 10mm e os tubos duplos com valores de 23mm a 33mm de diâmetro, bem como vários tipos de revestimentos com opções estéticas diferentes.

Para utilizar este tipo de elemento são necessários alguns componentes de ligação como R7's para elementos unifilares e TTS para elementos QHS bifilares.

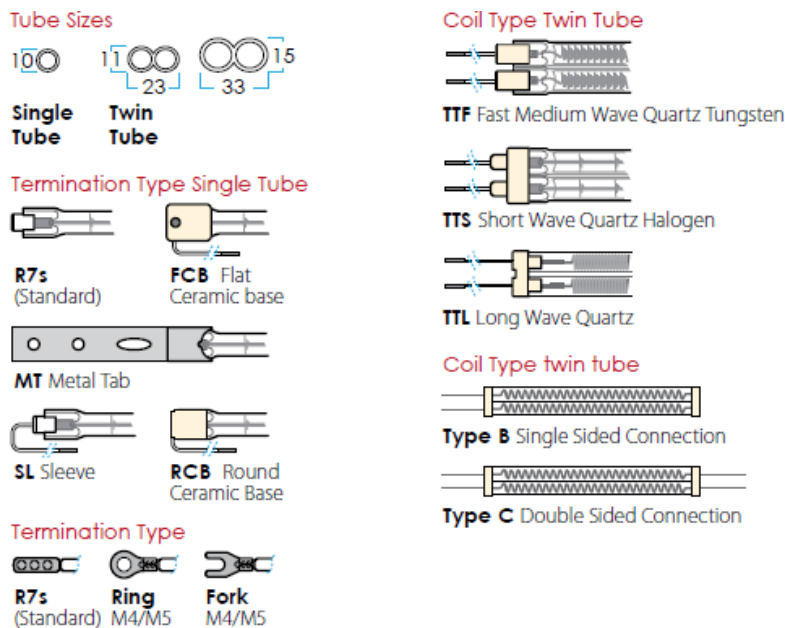


Figura 23 - Acessórios para Elementos Quartzo, Fonte: [19]

Existem alguns dispositivos que permitem aumentar significativamente a eficiência do sistema térmico, a ceramicx apresenta alguns elementos com o intuito de melhorar a eficácia do sistema no global, como projetores e refletores que consistem em elementos em aço com propriedades extremamente refletivas que podem ser colocados em sítios estratégicos dentro do forno de modo a obter uma reflexão controlada e precisa da onda emitida pelo refletor, contribuindo assim para a diminuição de perdas significativas. Estes elementos podem ser montados individualmente ou lado-a-lado, o que permite uma grande flexibilidade da montagem

no sistema a implementar. Para o tipo de elementos selecionados para este estudo de caso 1 o projetor adequado aos QHS, seria o QTSR, representado abaixo na figura.

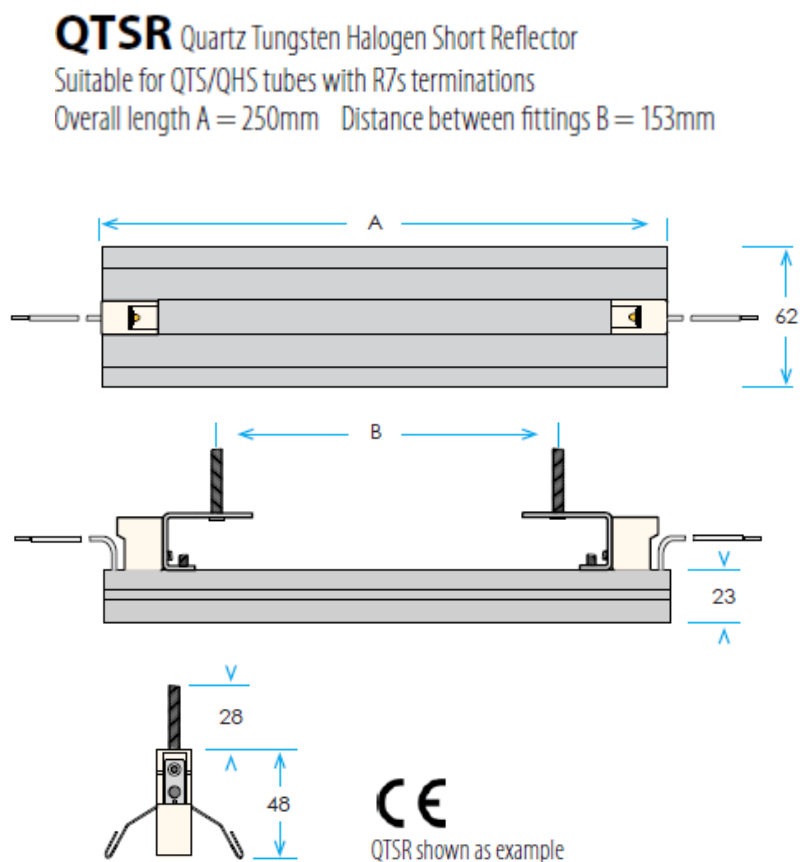


Figura 24 - Projetor QTSR para QHS, Fonte: [19]

A ceramics apresenta ainda uma segunda alternativa para melhorar a eficácia de elementos de quartzo halogéneo/tungsténio, os chamados FAST IR. Estes elementos de dimensões extremamente compactas, permitem otimizar a eficiência do sistema através de painéis de alumínio com propriedades extremamente refletivas em conjunto com ventoinhas de convecção diminuindo assim as perdas por convecção e mantendo os refletores a temperaturas baixas permitindo um melhor direcionamento da radiação IR.

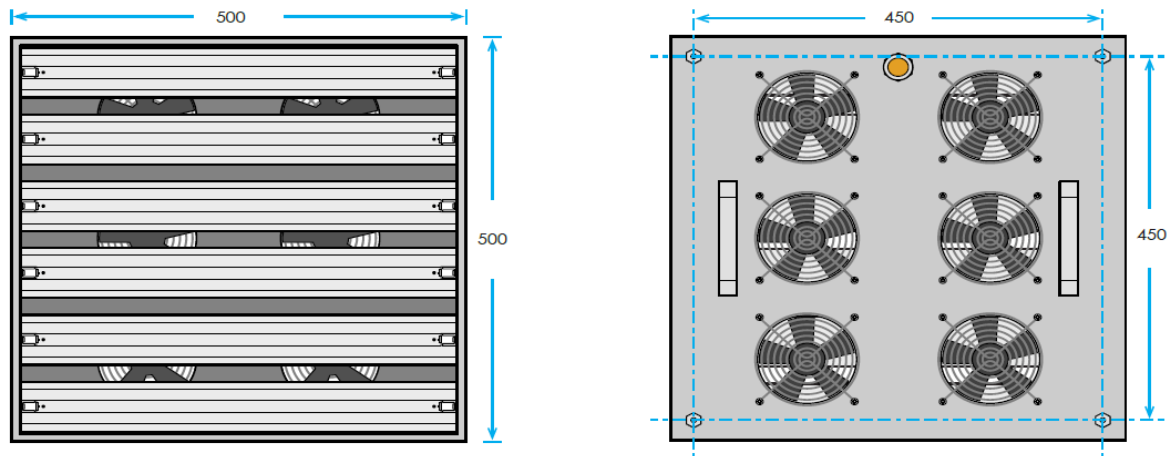


Figura 25 - FAST IR, Fonte: [19]

Nesta primeira fase a disposição dos elementos de aquecimento dentro da área útil do forno é ainda para efeitos de estudo e dimensional, assim para este **Estudo Caso 1** foram criadas duas iterações possíveis para a colocação dos elementos dentro do forno, onde as únicas diferenças entre ambos são a disposição dos elementos dentro do forno

À semelhança do capítulo anterior todos os elementos que se seguem foram reproduzidos recorrendo à ferramenta de desenho gráfico SolidWorks tendo por base as características fornecidas pelo fabricante.

Como já foi referido anteriormente para este Estudo de Caso 1 foram seleccionados os elementos QHS assim como os acessórios FAST IR e QTSR.

- **RESISTÊNCIAS QHS**

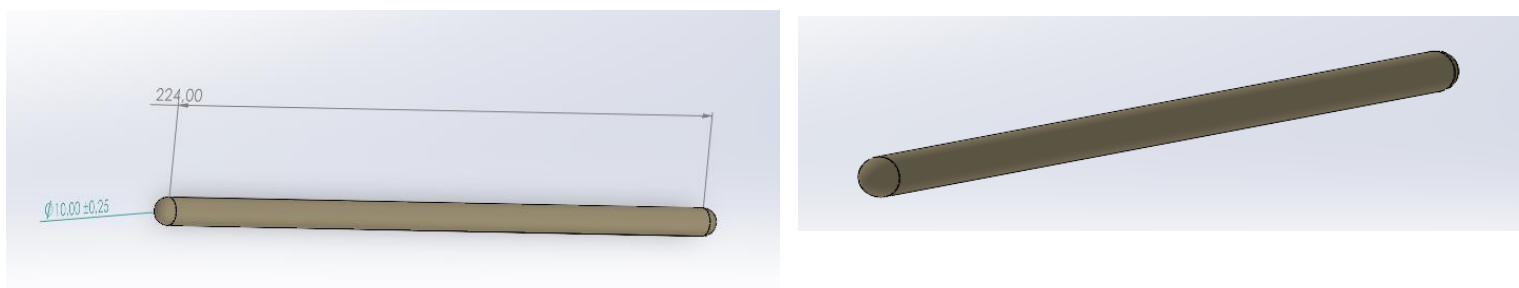


Figura 26 - Resistências QHS

- **QTSR**

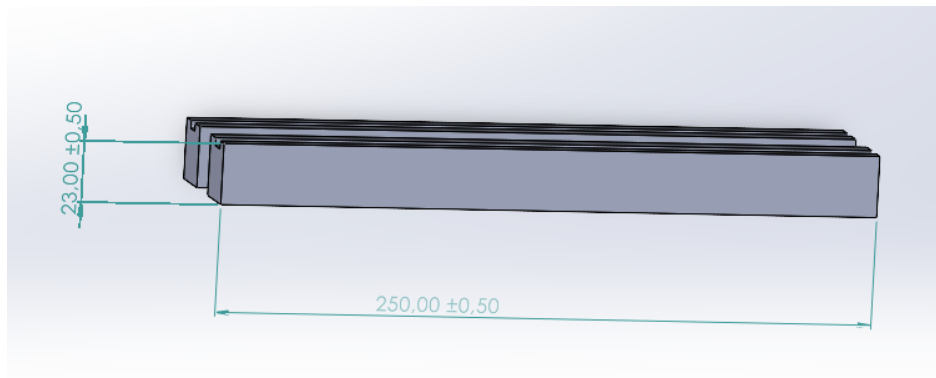


Figura 27 - QTSR (Dimensões Gerais)

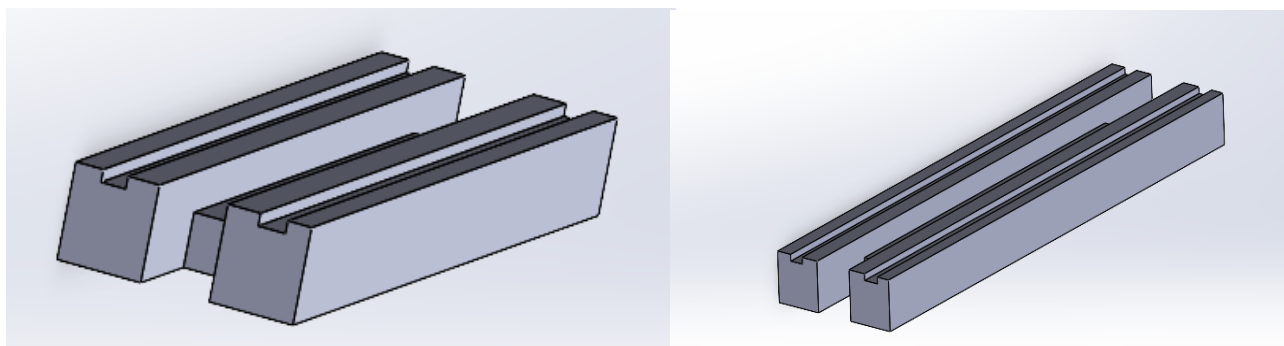


Figura 28 - QTSR (perspetivas)

- **FAST IR**

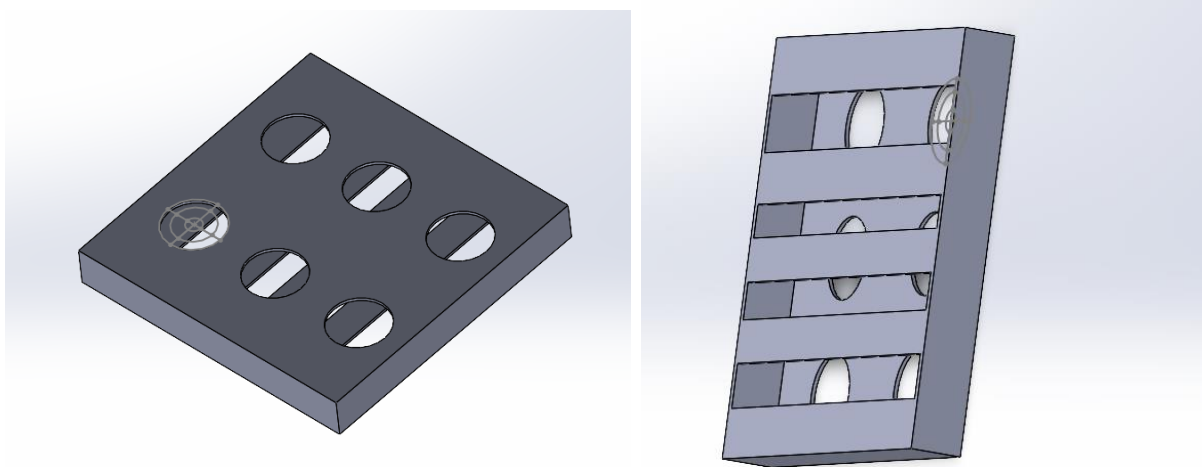


Figura 29 - FAST IR (PERSPECTIVAS SW)

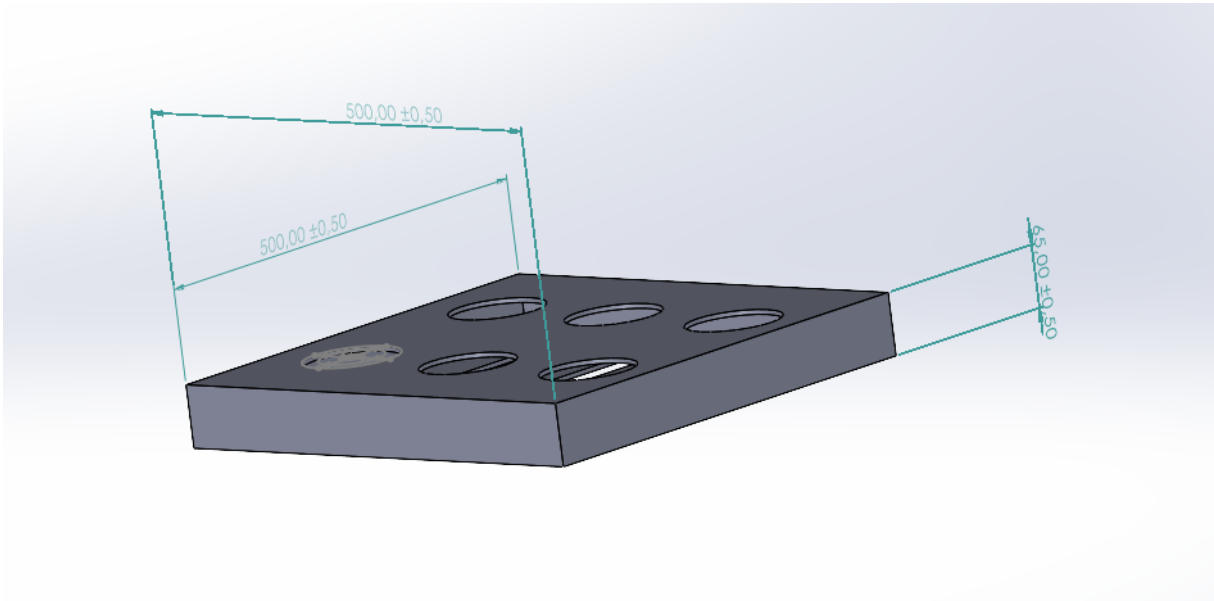


Figura 30- FAST IR (DIAGRAMA DIMENSIONAL)

As imagens seguintes representam a 1ª iteração para o estudo de Caso 1, onde estão representadas várias perspetivas que permitem uma melhor perceção espacial dos elementos dentro do forno.

Nesta iteração os elementos foram colocados na parede superior do forno, com os elementos QTSR a ocuparem a posição nas paredes laterais juntamente com o FAST IR colocado na base do forno.

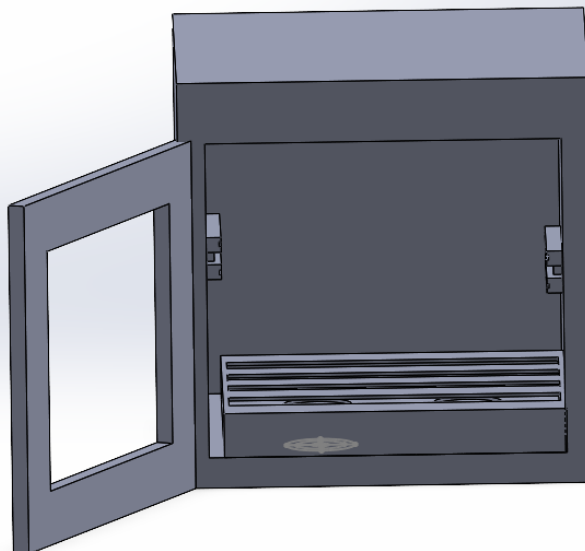
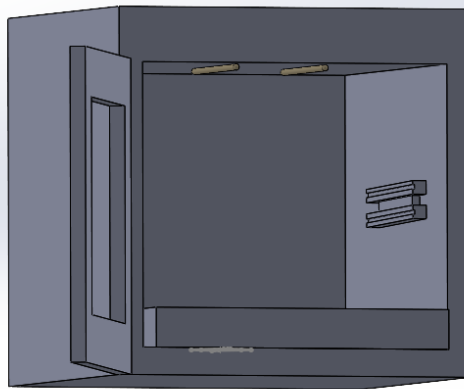
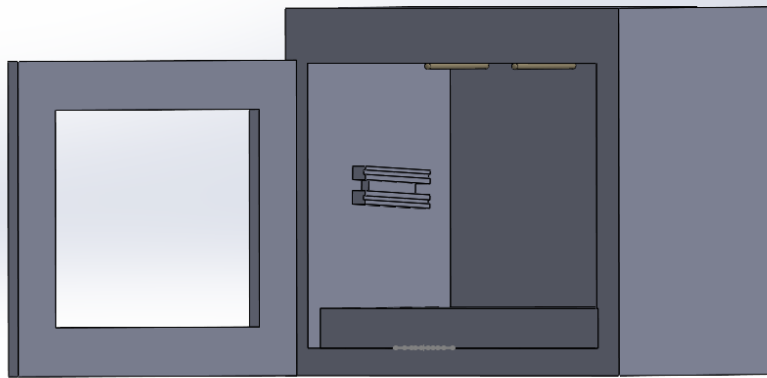


Figura 31- ESTUDO DE CASO 1 1º ITERAÇÃO

Na 2ª iteração do Estudo de caso 1 a posição dos elementos QHS foi alterada, adotando uma posição nas paredes laterais junto com os elementos QTSR ao invés do topo do forno como demonstrado na 1ª iteração. À semelhança da primeira iteração o FAST IR mantém a sua posição na base do forno.

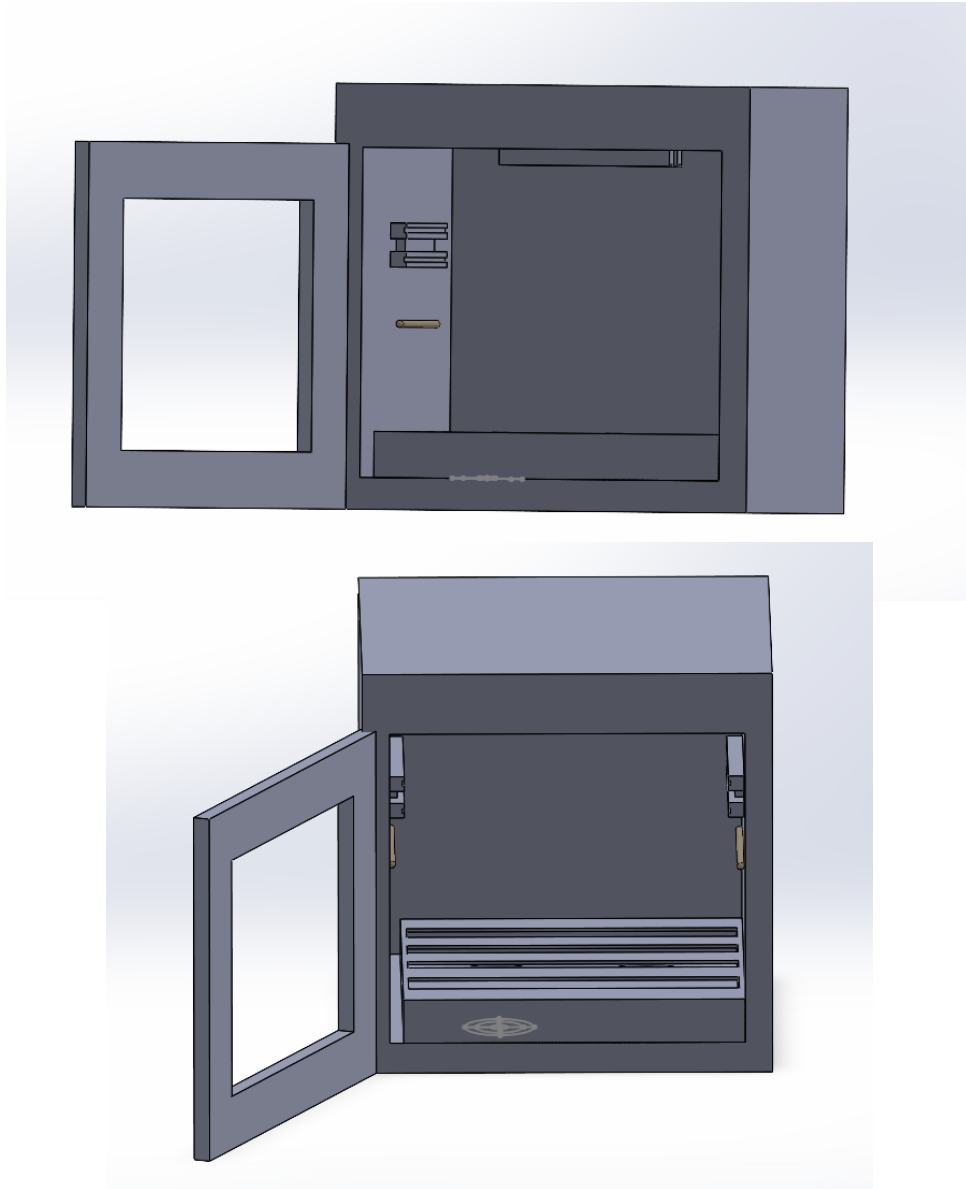


Figura 32- ESTUDO CASO 1 2ª ITERAÇÃO

Estudo de Caso 2: Elementos Cerâmicos de Quartzo.

Os elementos cerâmicos de quartzo apresentam como principal característica um consumo energético relativamente baixo, quando comparado com os restantes elementos de IR utilizados com o intuito de aquecer um dado objeto.

Estes tipos de elementos fornecem ondas infravermelhas na gama das ondas médias, são por isso usados com maior frequência para aplicações industriais que necessitem de uma taxa de aquecimento rápida e sistemas onde os períodos de interrupção do ciclo de aquecimento são longos.

Os elementos de quartzo têm um comprimento de onda que varia entre os 1.4 μm a 8 μm . Apesar de apresentarem valores mais reduzidos que os seus equivalentes cerâmicos continuam a apresentar valores de comprimentos de onda elevados e, portanto, taxas de penetração demasiado baixas para o tipo de elemento a aquecer.

Uma das vantagens deste tipo de elemento de aquecimento é o facto de apresentarem consumos energéticos mais reduzidos que os seus equivalentes halogéneo/tungsténio, a ceramicx, fornecedor utilizado para o desenvolvimento deste projeto apresenta um gama de elementos de quartzo que variam entre os 150W e os 1000W com a gama de temperaturas médias a variar desde os 343°C até aos 772°C de temperatura média máxima obtida por um elemento deste tipo.

Estes elementos são subdivididos em 3 categorias principais os “Full quartz Element” ou FQE, os “Half Quartz Element”, ou HQE e os Quarter Quartz Element” ou QQE, onde a principal diferença são as dimensões dos elementos.

Para este 2º estudo de caso foi seleccionado um elemento da categoria FQE de modo a rentabilizar ao máximo a área disponível dentro do forno. Este elemento, de formato retangular tem potências que variam entre os 150W e os 1000W e um peso médio.

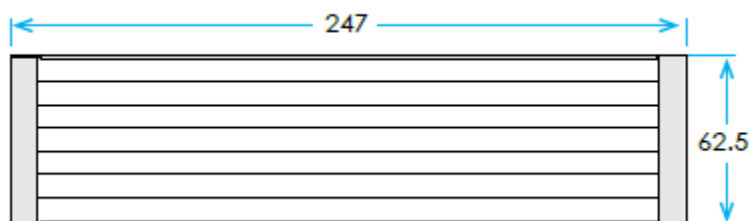
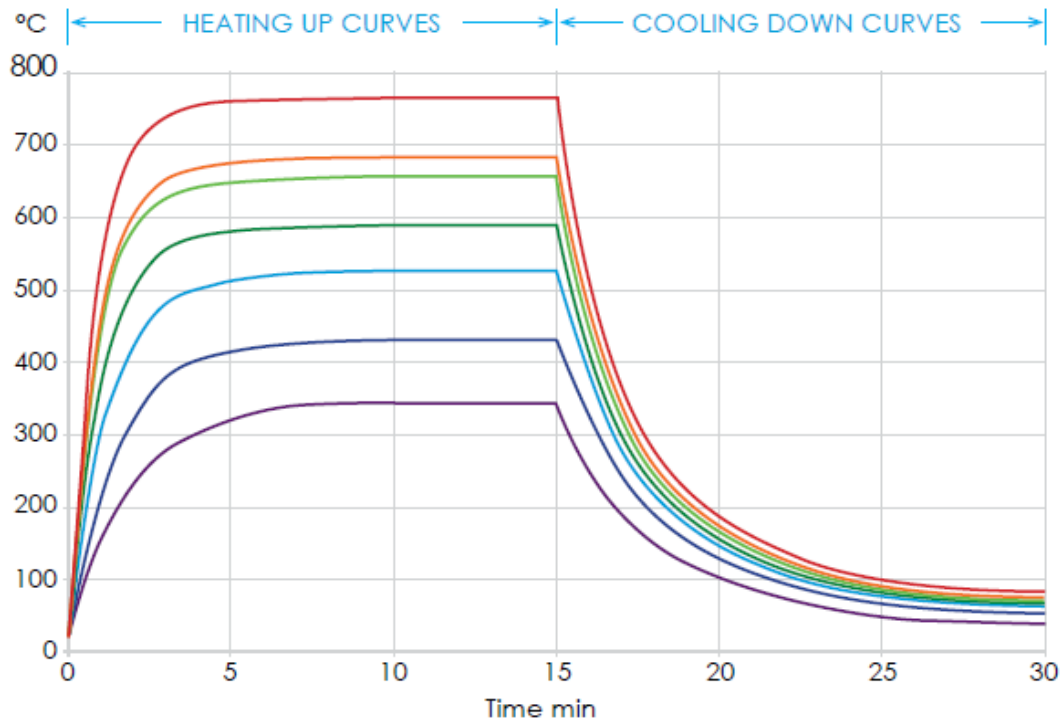


Figura 33 - Elemento FQE, Fonte: [19]

A figura abaixo (Figura 34), retirada do catálogo da ceramicx ilustra as curvas de aquecimento para os diversos tipos de elementos.



	FQE	HQE	QQE	SQE
—	1000W	500W	250W	1000W
—	750W			750W
—	650W	325W		650W
—	500W	250W		500W
—	400W			400W
—	250W			250W
—	150W			150W
	PFQE	PHQE		

Figura 34 - Gráfico características elementos FQE, Fonte: [19]

Dos gráficos acima representados retira-se que os elementos do tipo FQE apresentam potências na gama dos 150W até aos 1000W. De acordo com os principais objetivos deste projeto, baixo consumo energético, período de aquecimento rápido e máxima taxa de penetração máxima no produto a aquecer.

Por observação direta e sempre com o objetivo de manter os consumos energéticos o mais baixo possível e a temperatura de cozedura do pão de cerca de 250°C, foi selecionado para efeitos deste 2º estudo de caso o elemento **FQE de 250W**.

Ao observar a curva de aquecimento deste elemento conclui-se que o período de aquecimento deste elemento até à temperatura de operação é cerca de 4 – 5 mins com uma temperatura de 420°C aproximadamente

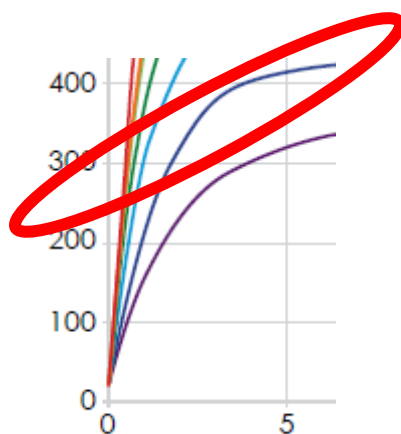


Figura 35 - Close up gráfico, Fonte: [19]

Fazendo o mesmo exercício de estudo de consumo energético procedeu-se aos seguintes cálculos.

Consumo = Potência * Tempo de funcionamento.

Considerando um forno com duas resistências de 250W e um período de funcionamento de 10 minutos por operação (fornada), o consumo estimado por operação seria cerca de 0,08335 kWh.

Uma vez que:

1h corresponde a 60min

0.1667h correspondem a 5min

$$500W \times 0.1667 \text{ horas} = 0.08335 \text{ kWh}$$

Os valores obtidos representam cerca de metade do consumo energético obtido por um forno convencional a gás ou elétrico, numa operação com 800g a 30 min com um consumo de 0.0884 kWh. [22] Apesar do consumo por kWh ser substancialmente superior ao consumo de um forno convencional, o curto período de tempo de operação do forno com elementos FQE representaria uma poupança de cerca 50% do consumo energético.

De acordo com o gráfico ilustrado na figura 30 pela linha azul escura, o elemento FQE de potência 250W tem uma temperatura operacional na faixa dos 400°C.

Como mencionado no EC1 o tradicional processo de cozedura do pão apresenta temperaturas de 250°C com tempos de cozedura até 40min dependendo do tipo de pão a cozer.

Assim como no EC1 a temperatura de funcionamento deste forno seria cerca do dobro para o normal processo de cozedura do pão, existindo assim um sobredimensionamento da potência do forno. Sobredimensionamento que representa desperdícios energéticos consideráveis que quando colmatados podem representar poupanças significativas na fatura energética.

Desta maneira e à semelhança do EC1 seria necessário a aplicação de um regulador de temperatura de modo a limitar a temperatura de funcionamento do equipamento à temperatura ideal para a cozedura do pão.

Outro aspeto a ter em conta ao considerar este tipo de elementos para estudo de caso é o fraco poder de penetração da gama de radiação emitida por este tipo de elemento, conforme mencionado anteriormente, aquando a descrição técnica deste tipo de elemento, a gama de radiação deste tipo de elemento IR situa-se na casa dos 1.4 a 8 μm , valores muito superiores aos requeridos pelas propriedades biológicas do pão, valores na gama dos 0.8 a 1 μm).

No que toca a acessórios de otimização energética do sistema térmico este tipo de acessórios é mais limitado na variedade de acessórios compatíveis com as características técnicas deste tipo de elemento. Ainda assim, o uso de refletores/projetores de radiação térmica é aconselhado pois iria permitir uma melhor distribuição da radiação na área de aquecimento, significando um aumento da eficiência energética.

Apesar da ceramicx, marca utilizada como referência na elaboração deste projeto, não dispor de um tipo de projetor específico para este tipo de elemento, a utilização de um projetor de aço/alumínio seria perfeitamente adequável ao elemento de quartzo. Dado as dimensões do elemento selecionado, FQE, o projetor que melhor se enquadraria neste elemento é o elemento com a denominação PAS 1, em que PAS – Projector Aluminised Steel apresenta as seguintes características dimensionais.

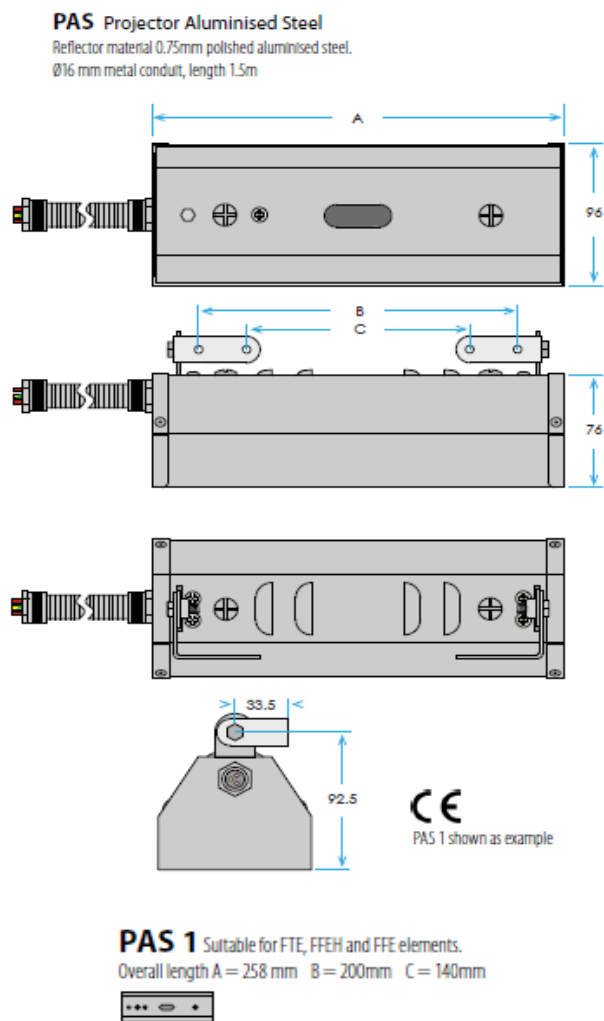


Figura 36 - PAS - PAS 1, Fonte: [19]

À semelhança do Estudo de caso 1 para este segundo estudo teórico/dimensional disposição dos elementos de aquecimento dentro da área útil do forno pode ainda ser alterada no decorrer do projeto e consequentes capítulos seguintes, assim para este **Estudo Caso 2** foram novamente criadas duas iterações possíveis para a colocação dos elementos dentro do forno, onde as únicas diferenças entre ambos são a disposição dos elementos dentro forno.

Para o Estudo de Caso 2 foram selecionados os elementos FQE em conjunto com o acessório PAS1. Todos os elementos e montagens do forno que se seguem foram criados no software de desenho técnico e computacional Solidworks com base nas características dimensionais fornecidas pelo fabricante dos elementos.

- **FQE**

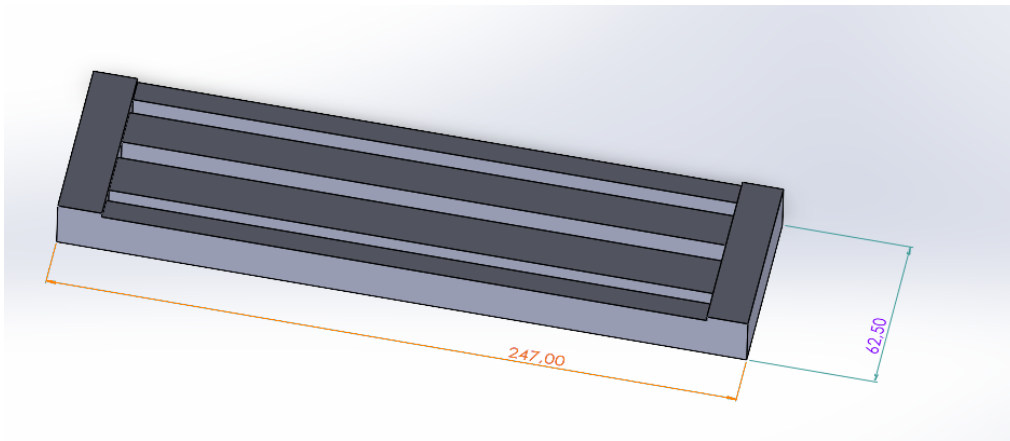


Figura 37 - Elemento IR FQE

- **PAS 1**

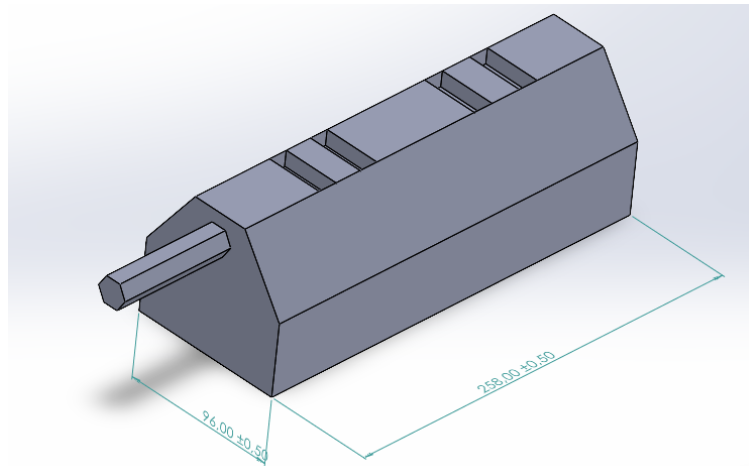


Figura 38 - PAS 1 dimensões gerais

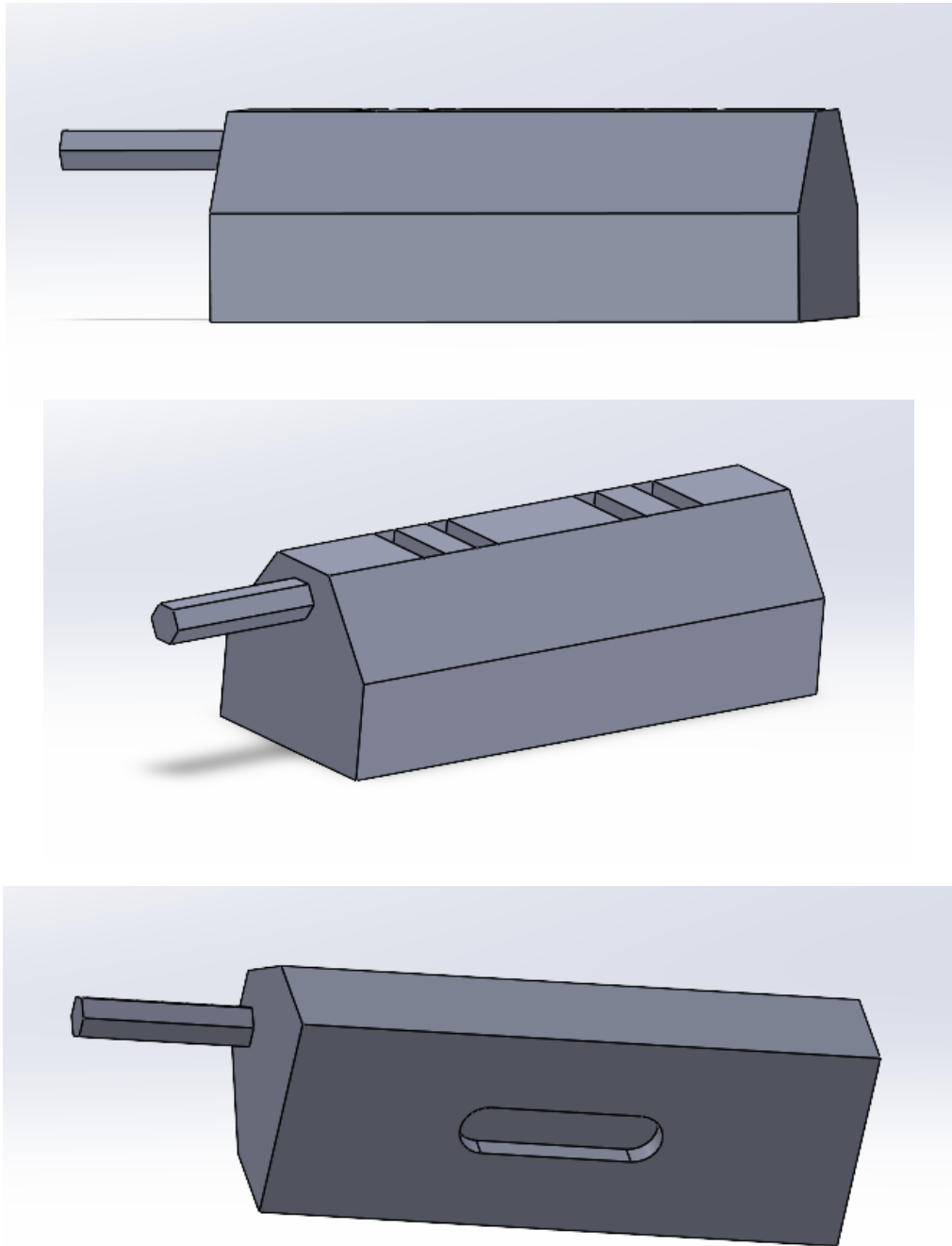


Figura 39 - PAS 1 perspectivas

AS imagens que seguem representam a 1ª iteração para o estudo de Caso 2, nesta primeira iteração os dois elementos FQE foram colocados em paralelo na base do forno. O acessório PAS 1 foi colocado no topo de forno de maneira a otimizar ao máximo a projeção de radiação para o centro do forno.

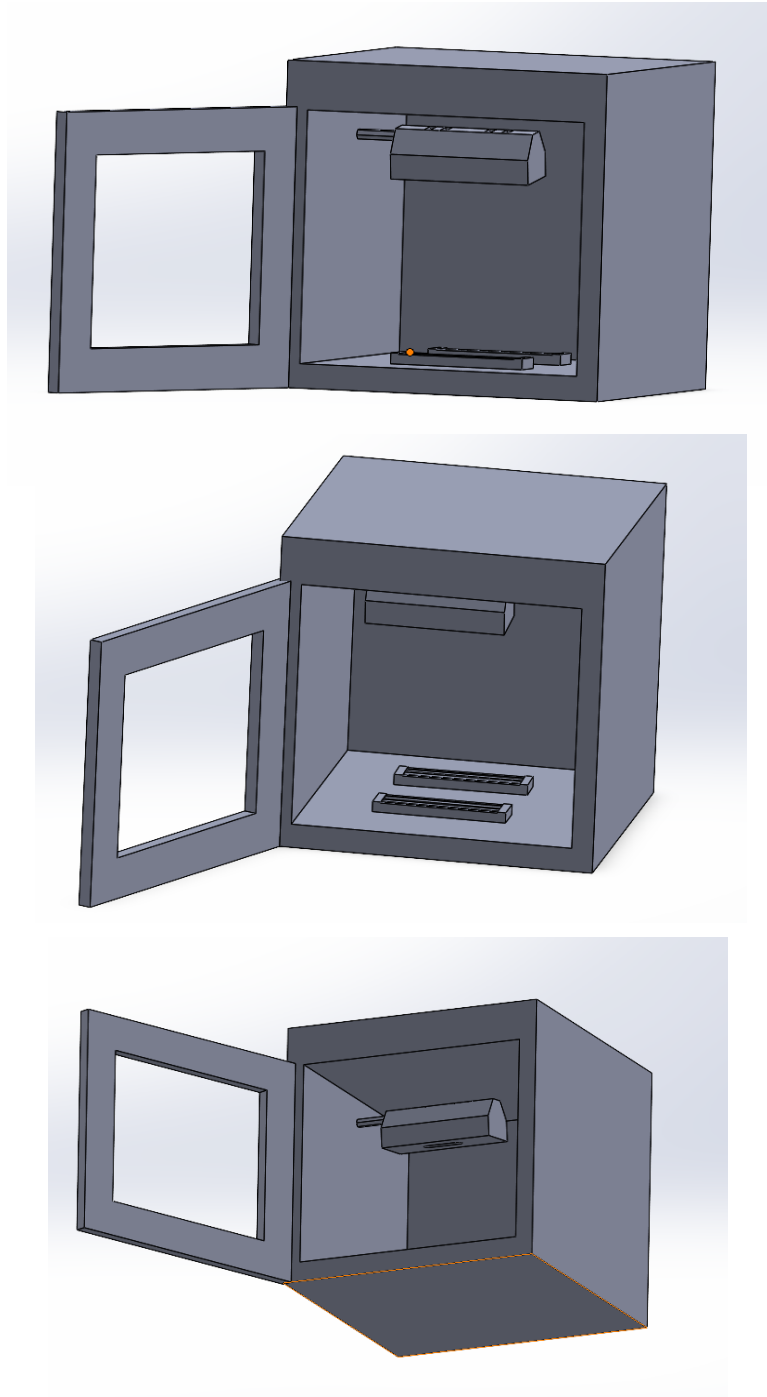


Figura 40 - Estudo de Caso 2 1ª iteração

Na segunda iteração deste Estudo de caso 2, segui uma abordagem diferente, colocando os dois elementos IR nas paredes laterais com o projetor – PAS 1 a ocupar o topo do forno.

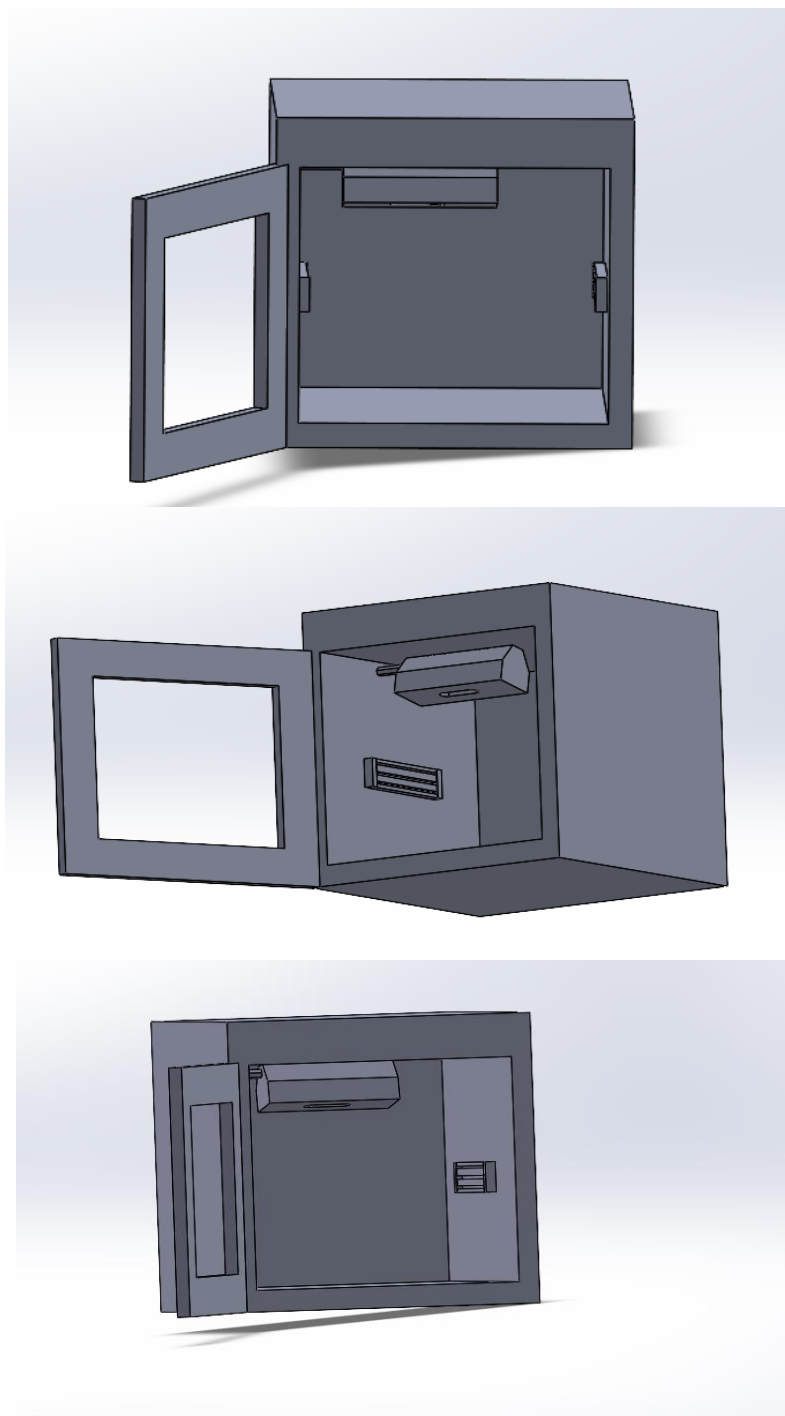


Figura 41 – Estudo de Caso 2 2ª iteração.

3.3 Seleção do Estudo de Caso (Discussão de resultados)

Tendo terminado a apresentação das duas possibilidades para o projeto do forno, Estudo de Caso 1 e Estudo de Caso 2 no capítulo anterior, neste capítulo vou apresentar qual dos Estudos de Caso foi o escolhido para o projeto do Forno e quais os motivos que me levaram a escolher esta opção à outra apresentada.

Um dos principais objetivos em projetar um forno para indústria panificadora com esta tecnologia é perseguir a maior eficiência energética possível garantindo que as perdas decorrentes do processo de cozedura são minimizadas. Assim o foco do projeto deve estar na otimização energética e, para tal a escolha do Estudo de Caso deve ter em conta este aspeto.

Conforme analisado em capítulos anteriores os diferentes objetos têm taxas de penetração de radiação infravermelha diferentes, o mesmo se aplica aos alimentos. O pão, foco principal neste projeto, tem uma taxa de penetração relativamente baixa, assim é relevante dar prioridade a este aspeto biológico.

Os dois estudos de Caso apresentam características bastantes dissimilares, no estudo de caso 1, embora os elementos IR necessitem de maior potência energética para operar, requerem ciclos de funcionamento bastante mais curtos e, o espectro de radiação IR emitida por estes elementos é considerada ideal para o tipo de alimento a cozer, o pão. No estudo de caso 2 acontece um cenário quase oposto, neste estudo de caso os elementos IR selecionados usam uma quantidade de potência elétrica bastante inferior ao estudo de caso 1 mas o espectro da radiação IR emitida é bastante superior ao considerado ideal para o processo de cozedura do pão, levando a uma quantidade de perdas energéticas superior e, de acordo com [5] um produto final com uma qualidade bastante inferior dado a baixa penetração da radiação no pão.

Assim dando prioridade à otimização energética e com base nas ilações descritas acima, o Estudo de Caso 1 será o estudo teórico no qual vou basear o projeto deste forno, que será abordado e aprofundado em capítulos seguintes.

4. Análise Computacional (CFD)

Com a atual crise mundial vivida no presente ano de 2022 despoletada por uma variedade de fatores entre os quais a guerra entre a Ucrânia e a Rússia, muitos fabricantes vêm se obrigados a reduzir os custos ao estritamente essencial, a atual escassez de matérias primas como metais pesados e outras ligas metálicas e cerâmicas levou a uma escalada de preços, obrigando muitos fabricantes a repensarem as suas estratégias de produção e reinvenção.

Também o mercado de semicondutores é atualmente um mercado extremamente afetado com a escassez de componentes muitos fabricantes chegam mesmo suspender linhas de produção por completo, indústrias como a automotiva e tecnologias de comunicação.

Assim seguindo a linha de pensamento anterior e apesar de este projeto de tese de mestrado ser um projeto de desenvolvimento e experimentação considere necessário dar prioridade a ferramentas computorizadas que permitam simular o comportamento do forno a implementar e assim, saltar iterações práticas. Esta estratégia de desenvolvimento permite reduzir significativamente custos, ao produzir apenas uma iteração de forno.

4.1. Software de análise CFD (SOLIDWORKS Flow Simulation)

De maneira a simular o comportamento termodinâmico dos elementos IR no interior do forno usei a ferramenta computacional “Solidworks Flow Simulation”.

Este software é um plug-in do Solidworks de CFD (Computational Fluid Dynamics) que permite criar modelos termodinâmicos e assim simular o comportamento de fluxos líquidos e gasosos nos desenhos CAD (Computer-Aided Design) criados previamente com o software Solidworks. É uma ferramenta extremamente poderosa que vai auxiliar no estudo termodinâmico do forno a projetar.

4.2. ESTUDO DE CFD PARA O FORNO.

O estudo do comportamento térmico de um equipamento permite compreender os fenômenos de convecção, condução e radiação. Estes fenômenos dados as suas características físicas são difíceis compreender e quantificar se não dispusermos de ferramentas de medição e registo apropriadas, assim o uso de software de simulação permite observar de forma direta e intuitiva os diversos fenômenos termodinâmicos.

Para o estudo Computational Fluid Dynamics (CFD) do forno a implementar usei como referido anteriormente o software “flow simulation”. Para realizar o estudo CFD é necessário carregar no software de estudo CFD o modelo 3d criado previamente do forno. Depois de carregado existem alguns detalhes importantes a ter em conta.

Primeiramente é necessário criar um cenário de simulação recorrendo à ferramenta “wizard”, nesta etapa são definidas as propriedades física do cenário a criar, são introduzidos valores como tipo de mecanismo de transferência de energia a simular, temperaturas médias, introduzir variáveis como a ação da gravidade entre outros aspetos. Como o elemento a estudar é considerado um ambiente fechado é também importante definir o tipo de gases ou líquidos nele contidos, neste caso para efeitos de estudo foi selecionado “ar” como o gás presente no interior do forno.

Outro aspeto importante a definir é o tipo de material do objeto a estudar e a natureza do material quanto às propriedades físicas nas fronteiras do objeto com o ambiente em que se insere, neste caso a estrutura do forno. Uma vez que o objetivo principal é assegurar a máxima eficiência energética as paredes interiores do forno devem ter propriedades refletivas, características presentes numa denominada “White Wall”, que reflete toda a radiação nela incidente.

As etapas seguintes são atribuição de materiais aos respetivos elementos presentes no forno, uma vez que diretório de materiais presentes no software é algo limitado no que toca a elementos IR, foi necessário escolher um material que tivesse características semelhantes e fosse capaz de suportar as altas temperaturas requeridas. Assim, para o elemento IR seleccionei o titânio para efeitos de simulação quanto aos restantes elementos como os refletores QTSR e o FAST IR seleccionei um aço com propriedades refletivas.

Uma vez que o forno a simular tem nesta configuração dois refletores instalados é importante configurar estes dois elementos como “superfícies reflexivas”, estes elementos à semelhança das paredes interiores têm propriedades reflexivas totais, também denominadas pelo software de “White Walls”.

Por fim realiza-se as configurações das fontes de calor, que serão atribuídas às duas resistências do tipo QHS com 750W de potência em cada elemento.

4.2.1. Simulações CFD

A realização deste estudo comparativo é extremamente importante pois, na impossibilidade de criar modelos físicos das várias iterações com as simulações é possível observar a distribuição de calor dentro do forno e comparar entre as várias versões criadas assim, uma vez introduzidos os modelos das duas iterações criadas do *Estudo de Caso 1*, obtiveram-se os resultados ilustrados e apresentados nos capítulos seguintes, gerados na totalidade com o software dos quais resultaram

modelações 3d da dispersão de calor dentro de forno para as duas iterações do forno criadas.

4.2.1.1 Simulação CFD Estudo de Caso 1 iteração 1.

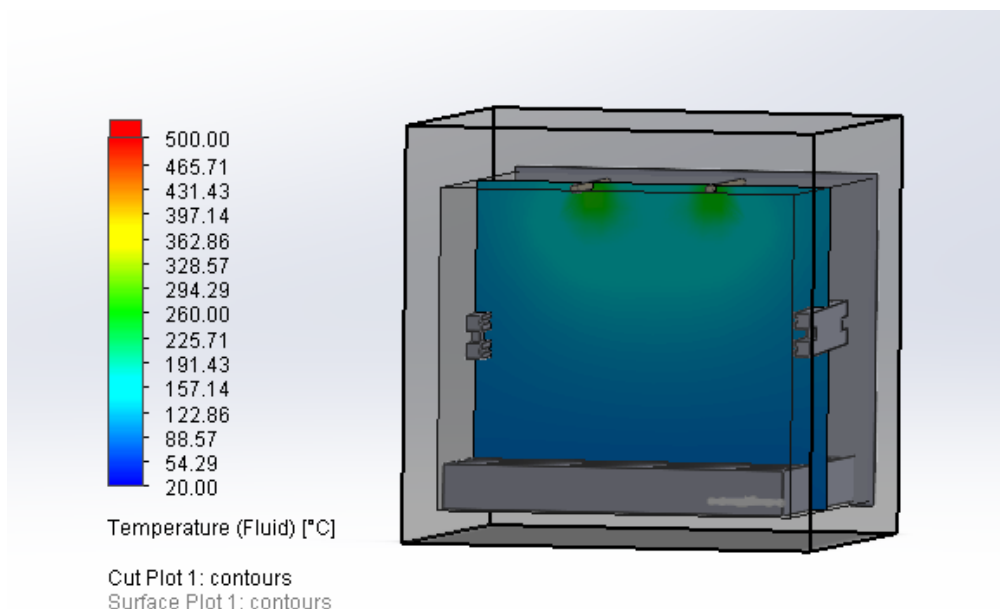


Figura 42 - CFD EC1 IT1

Na imagem (Figura 42) acima representada está ilustrado o estudo CFD que foi realizado à 1ª iteração que fiz para o estudo de caso 1, estudo de caso selecionado para o forno.

Ao analisar a imagem existem algumas considerações que se podem retirar, a distribuição de calor embora esteja equilibrada, existindo uma boa dispersão energia na maioria da área do forno, existe uma maior concentração de radiação na parte superior do forno tornado o uso dos refletores e do FAST IR um pouco redundantes nesta configuração.

Embora as temperaturas médias presentes no interior do forno estejam de acordo com as temperaturas requeridas para o processo de cozedura do forno, as propriedades físicas desta componente levam o calor a subir à parte superior do forno devido ao fenómeno de convecção e assim grande parte do calor/energia gerada pela radiação IR está a ser localizada incorretamente na parte superior do forno ao invés da parte central, levando a uma perda da eficiência energética e conseqüente quebra de rendimento.

4.2.1.2. Simulação CFD Estudo de Caso 1 iteração 2.

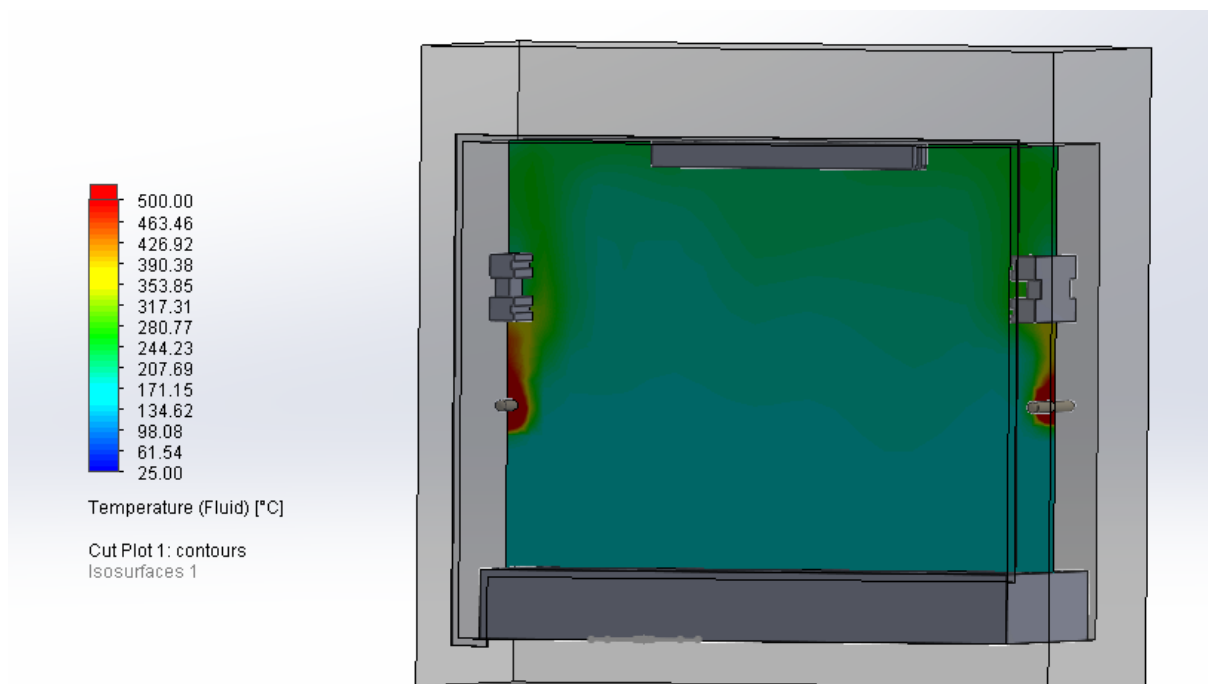


Figura 43 - CFD EC1 IT2

Na figura (Figura 43) acima esta representado o estudo obtido através da simulação CFD para a segunda iteração do Estudo de Caso 1.

Nesta segunda iteração, conforme referido anteriormente a disposição dos elementos IR foi alterada para uma posição lateral ao invés de colocadas na parede superior como ilustrada na iteração 1. Esta alteração na disposição dos elementos teve como principal objetivo colmatar o efeito da convecção no interior do forno.

A imagem acima ilustrada pela Figura 43 é o resultado obtido pela simulação CFD realizada para a iteração dois do forno. Como pode ser observado na figura a distribuição de calor ao longo da área do forno é mais equilibrada, sendo mais uniforme em toda a área de aquecimento do forno. Isto significa que adotando esta disposição de elementos os resultados obtidos serão mais vantajosos não só para a eficiência energética do forno, mas também para a qualidade final do produto a cozer.

Ao analisar a imagem gerada acima com mais detalhe observa-se que a gama de temperaturas localizada na faixa central do forno, onde se situará o tabuleiro para a cozedura, apresenta uma gama de temperaturas médias entre os 200°C e os 250°C, temperaturas perfeitamente aceitáveis para o processo de cozedura.

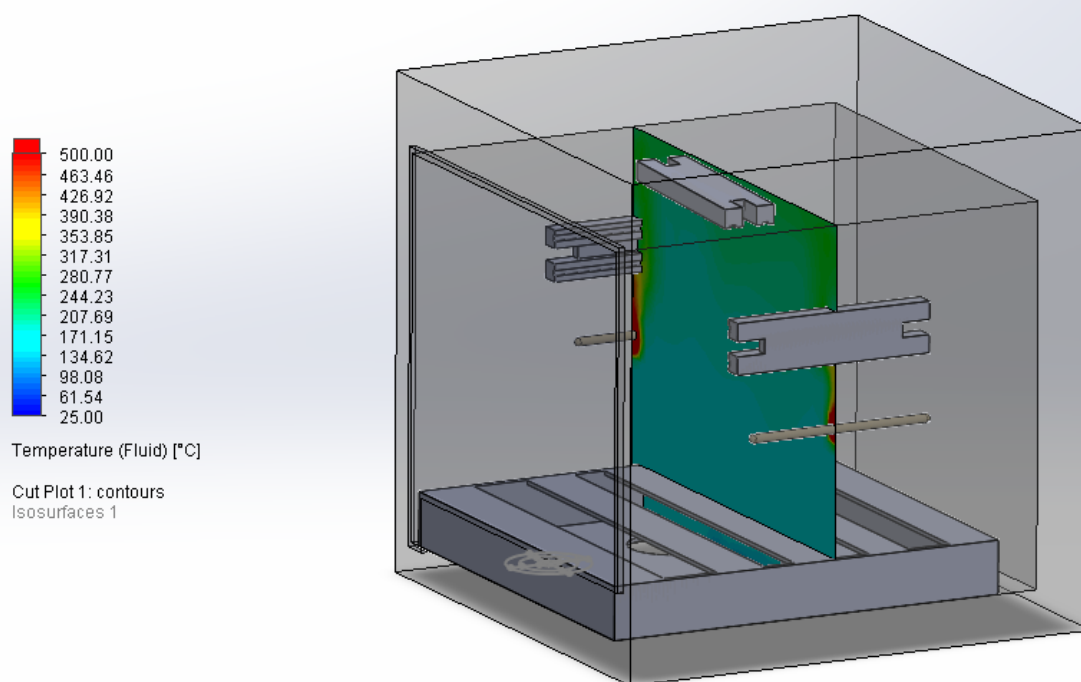


Figura 44 - PERFIL CFD EC1 IT2

Na simulação acima representada pelas Figuras 43 e 44, o elemento FAST IR não foi tido em conta para efeitos de simulação, o que indica que uma vez operacional a distribuição de calor na área do forno será ainda mais uniforme, aumentando a eficiência global do forno, permitindo uma maior área de incidência de radiação IR sobre o tabuleiro de cozedura.

4.2.2 Conclusão do ESTUDO CFD / DECISÃO

Realizadas as simulações para ambas as iterações criadas, facilmente se conclui ao analisar as imagens geradas pelo software que a assinatura térmica demonstrada na iteração 2 é a mais equilibrada, a distribuição de temperaturas ao longo da área de aquecimento é mais uniforme como indicado anteriormente.

Com base nestes resultados será esta a disposição de elementos seleccionada que servirá de base para a construção de um futuro protótipo deste forno uma vez que das duas opções geradas é aquela que apresenta características capazes de gerar um maior rendimento energético, foco principal na construção deste forno.

4.3 INVENTÁRIO PEÇAS / QUANTIDADES

Concluído o estudo teórico analisado detalhadamente em capítulos anteriores resultou a escolha do modelo que denominamos por “Estudo de Caso 1 – iteração 2” que, a partir deste capítulo e de maneira a simplificar os termos empregues vou passar a denominar por “Protótipo I”.

Este protótipo é constituído por uma série de componentes que vou passar a detalhar ao longo deste capítulo.

- 1 X Caixa forte em aço inoxidável, com porta estanque funcional;
- 2 X Elementos QHS;
- 2 X Elementos IR QTSR;
- 1 X FAST IR;
- Módulo de controlo;
- Módulo de alimentação.

4.6.1. Orçamento Estimado.

Foram feitas várias tentativas de contacto sem resultados concretos com a empresa fornecedora de elementos IR, desta forma os preços para estes elementos serão calculados com base numa estimativa por termo de comparação com elementos semelhantes do mercado retirados de sites como “horecatiger”. [23]

1 X Caixa forte: 115 € + IVA

2 x QHS: 2 x 28 € = 56 € + IVA

2 X QTSR: 2 x 18 € = 26 €

1 X FAST IR: 1 x 120 € (estim.) = 90€

1 X módulo de controlo: 1 X 94€ = 94€

1 X módulo alimentação: 1 x 45€ = 45€

Outros (circuitos, vedantes, etc.): +/- 50€

Total: **476 €** (estimados)

Este valor apesar de ser um valor estimado vai de encontro aos valores praticados atualmente nos fornos de convecção convencionais como o exemplo seguinte (Figura 45), um forno da marca “maxima” que possui características semelhantes ao “protótipo I” cujo preço de venda ao público ronda dos 350€.



Figura 45 - Forno Convecção Maxima 43.5x31.5 (Fonte: [25])

5. Estudo Económico

Ao criar um protótipo com uma tecnologia inovadora no ramo da indústria panificadora, é de extrema relevância perceber quais as poupanças económicas que resultam desta inovação.

Ao longo deste capítulo será apresentado um breve estudo que permite deduzir os custos de funcionamento de um forno com esta tecnologia ao longo do seu tempo de vida útil, dados que são extremamente úteis para responsáveis de produção no momento de investimento em novos equipamentos.

Protótipo I:

Considerando:

- Funcionamento 10 minutos por fornada, 3 fornadas por dia = 0.5 horas/dia
- Preço eletricidade médio 0.23770 €/kWh
- 10 anos de funcionamento 365 dias por ano

- **1 ANO:** $476€ + (1500 \times 0.5 \times 365 \times 0.23770) = 476€ + 65,07 €$

Consumo Energético para 1 ano = 273.75 kWh

$476€$ (invest. inicial) + $65.07€ = 541.07 €$

- **10 ANOS:** $476€ + (1500 \times 0.5 \times 365 \times 10 \times 0.23770) = 476€ + 650.70 €$

Consumo Energético para 10 anos = 2737.50 kWh

$476€$ (invest. inicial) + $650.70 € = 1126,7 €$

Que se traduz num custo estimado de 1 126,7 € (custo a 10 anos)

Preço por fornada: 0.06 €

Forno Convencional:

Considerando:

- Funcionamento 50 (20 minutos de pré-aquecimento + 30 minutos de cozedura) minutos por fornada, 3 fornadas por dia = 2.5 horas/dia
- Preço eletricidade médio 0.23770 €/kWh
- 10 anos de funcionamento 365 dias por ano

- **1 ANO:** $350€ + (2000 \times 2.5 \times 365 \times 0.23770) = 350€ + 433.80 €$

Consumo Energético para 1 ano = 1825 kWh

$350€$ (invest. inicial) + 433.80 = 783.8 €

- **10 ANOS:** $350€ + (2000 \times 2.5 \times 365 \times 10 \times 0.23770) = 476€ + 4\,338.02 €$

Consumo Energético para 10 anos = 18 250 kWh

$350€$ (invest. inicial) + 4 338.02 x 18 250 = 350 € + 4 338.02 = 4 688.02 €

Que se traduz num custo estimado de 4 688.02 € (custo a 10 anos):

Poupança em € na escolha do Protótipo I ao fim de 10 anos tempo de vida esperado para ambos os equipamentos:

- **Poupança a 10 anos:** $4\,338.02 € - 1\,126.70 € = 3\,211.32 €$

Ou, **321,132 €** de poupança anuais na fatura da energia elétrica.

Para este estudo económico não foram acautelados eventuais gastos energéticos consumidos pelos diversos elementos de controlo do forno, pelo que o valor de poupança acima representado poderá ser ligeiramente inferior.

Apesar de ser um estudo teórico e os tempos de cozedura assumidos para os cálculos serem meramente estimativas, rapidamente se conclui que a poupança obtida ao preferir o uso do protótipo I a um forno convencional é substancial.

Esta diferença de valores está essencialmente assente no facto de o tempo de pré-aquecimento do Protótipo I ser praticamente residual, bem como o tempo de cozedura devido às elevadas taxas de absorção da massa de pão da radiação IR emitida pelos elementos a utilizar.

Estes fatores levam a um tempo efetivo de funcionamento bastante inferior traduzindo-se em elevados ganhos na poupança energética, tanto a curto como a longo prazo.

	Forno Convencional	Protótipo I
INVESTIMENTO INICIAL	350 €	476 €
CUSTO PRODUÇÃO (1 ANO) + INV.INICIAL	783.8 €	541.07 €
CUSTO PRODUÇÃO (10 ANOS) + INV.INICIAL	4 688.02 €	1126,7 €
POUPANÇA ANUAL	321.13 €	
POUPANÇA A 10 ANOS	3 211.32 €	

Tabela 3 - Estudo Económico Forno Convencional e Protótipo I

6. INTEGRAÇÃO NO ÂMBITO DA GESTÃO DE ATIVOS FÍSICOS.

Apesar do projeto que serve de tema a esta tese estar inserido diretamente na área da engenharia mecânica, abordando temas como fabrico assistido por computador, mecânica de fluidos e termodinâmica, acho relevante a criação deste capítulo como a ponte de ligação entre o projeto a desenvolver e o mestrado que lhe serve de base, Mestrado em Gestão de Ativos Físicos.

A criação de um protótipo é um processo que requer alguns cuidados uma vez que muita da informação de desenvolvimento ainda não foi adquirida. Dados como tempos de vida útil do equipamento e componentes, manutenção, periodicidade de manutenção devem ser estudados. Estes dados são obtidos com base em experimentação e recolha e tratamento de dados. Ao criar um protótipo com uma tecnologia ainda numa fase bastante embrionária na indústria é também fulcral a criação de planos de manutenção dos equipamentos bem como manuais de utilização e análises de risco, para assegurar a segurança de todos os utilizadores.

Uma vez que o uso da tecnologia estudada ao longo desta tese ainda tem pouca presença na indústria alimentar/panificadora, a quantidade de informação disponível quanto a planos de manutenção e tempos de vida de fornos com esta tecnologia é ainda escassa. Apesar da falta de informação disponível existem alguns elementos básicos na indústria que se podem ter em conta no que toca à manutenção e bom funcionamento do equipamento, elementos esses que foram estudados e abordados ao longo do mestrado de Engenharia e Gestão de Ativos Físicos.

6.1 Plano de Manutenção Protótipo I

Por norma equipamentos utilizados nas mais variadas indústrias são sujeitos ciclos de funcionamento intensivos que fora do âmbito industrial raramente se verificam como é o caso do forno a desenvolver nesta tese. O tempo de funcionamento de um forno industrial para panificação é significativamente mais longo do que um forno doméstico usado para o mesmo efeito. Existem algumas ações de manutenção preventiva aplicadas em equipamentos na indústria em geral que se podem transpor para este forno e, desta maneira assegurar o seu correto funcionamento e o prolongamento da vida útil do mesmo.

6.1.1 Ações de Manutenção Preventiva Protótipo I

Como mencionado anteriormente existem algumas ações que quando realizadas atempadamente e sistematicamente contribuem para um correto funcionamento do equipamento e prolongamento da vida útil:

- Respeitar as condições de funcionamento do equipamento, como potências indicadas e valores de temperaturas e humidade no ambiente envolvente recomendados;
- Assegurar um ambiente seguro na área envolvente ao equipamento, deve ser um ambiente onde não exista o risco de derrame de líquidos no forno ou a queda de objetos sobre o mesmo;
- Manter todos os elementos do forno em perfeito estado, assegurando a limpeza frequente dos mesmos.

Devido à natureza de construção de elementos em IR e às suas propriedades físicas, não são necessários outros tipos de manutenções programadas ao contrário de outros elementos de aquecimento. A elevada robustez destes elementos fica assegurada desde que o seu funcionamento não seja negligenciado, mantendo todos os elementos devidamente limpos e protegidos.

6.2. Tempo de Vida útil do Protótipo I

Dados como o tempo de vida útil são muitas vezes obtidos devido à experimentação e testagem sucessivas em banco de ensaios. Testar um protótipo num banco de ensaios permite criar um modelo que traduz a o desgaste de componentes, permitindo desta maneira determinar o tempo de vida esperado para o protótipo ou para um elemento em concreto sujeito a múltiplos ciclos de funcionamento.

Uma vez que a criação deste projeto não foi possível de realizar por múltiplas razões já enumeradas, este fator pode ser estimado com base em dados recolhidos.

De acordo com alguns fabricantes de elementos deste tipo, o tempo de vida dos mesmos estima-se entre os 10 – 12 anos ou 100000 horas de uso, o que torna a tecnologia extremamente rentável quando aplicada à indústria panificadora. A salientar também que o método de instalação destes elementos permite a sua rápida e pouco laboriosa substituição.

Os restantes elementos, como sistemas elétricos, vedantes e outras partes integrantes do protótipo apresentam um tempo de vida considerado regular, desta forma o tempo de vida para um forno deste tipo situa-se nos 10-15 anos.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este projeto foi realizado com o intuito de avaliar a possibilidade de construção de um forno dedicado à indústria panificadora recorrendo a tecnologia IR (Infravermelhos) e perceber a sua eficácia e eficiência nesta operação.

No presente trabalho foi realizado um estudo teórico para compreender as propriedades biológicas do pão e em como a radiação IR afetaria essas mesmas propriedades bem como a qualidade do produto final.

Concluído este estudo retiramos que a taxa de eficácia no processo de cozedura do pão está diretamente ligado com o comprimento de onda da radiação IR, a massa do pão necessita de comprimentos de onda curtos, na gama dos 0.7 a 2.5 μm .

De seguida foi realizada a seleção de elementos a utilizar dentro da gama Ceramicx, devido à quantidade de informação disponível assim como a modelação 3d do protótipo de forno a desenvolver e todos os elementos constituintes no software Solidworks.

Deste modo, foram efetuados dois *Estudos de Caso* onde ao longo do documento realizamos a comparação direta entre ambos, com o intuito de selecionar aquele que melhor se enquadraria nos requisitos do projeto

Uma vez que estávamos algo limitados em recursos físicos, devido à indisponibilidade de materiais e também para economizar recursos financeiros nesta fase embrionária do projeto decidimos fazer o estudo computacional do comportamento do forno e perceber se desempenharia o propósito desejado.

Esta foi sem dúvida a parte mais exigente do projeto, a falta de bases teóricas no software exigiu bastante pesquisa e estudo para conseguir realizar uma simulação Computational Fluid Dynamics (CFD).

Apesar das dificuldades superamos o desafio e obtivemos duas simulações CFD dos dois estudos de caso em comparação, concluindo que o estudo de caso 1 seria o selecionado. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios estando dentro dos valores aceitáveis para os parâmetros de cozedura a efetuar.

Quanto a trabalhos futuros gostaríamos de ter a oportunidade de construir o protótipo desenvolvido no software de CFD e verificar a correlação dos dados obtidos na simulação com os resultados práticos obtidos com o forno real.

Seria também interessante avaliar a possibilidade de patentear o forno desenvolvido ao longo desta tese.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O. d. Energia, “observatóriodaenergia.pt,” 2021 Maio. [Online]. Available: https://www.observatoriodaenergia.pt/wp-content/uploads/2021/05/Energia_em_numeros_2021.pdf. [Acedido em 07 02 2022].
- [2] maisagro, “maisagro.pt,” Outubro 2018. [Online]. Available: <https://maisagro.pt/energ/guia-de-boas-praticas-gestao-de-consumos-energeticos/>. [Acedido em Fevereiro 2022].
- [3] B. M. e K. A., “Energieeffizienz in der Industrie. Berlin: Springer,” 2017. [Online]. Available: doi: 10.1007/978-3-662-55999-4.
- [4] J. Schulz, M. Von Bargen e B. Kuther, “Energieeffizienz in Bäckereien - Energieeinsparungen in Backstube und Filialen,” Bremerhaven, 2014.
- [5] C. S. & C. Andersson, “A Comparison of Infrared Bread Baking and Conventional Baking,” *A Comparison of Infrared Bread Baking and Conventional Baking, Journal of Microwave Power and Eletromagnetic Energy*, vol. 2, pp. 91-101, 1989.
- [6] W. C. S. M. H. C. & J. Y. H. Yung Shin Shyu, “Effect of Far-Infrared Oven on the Qualities of Bakery Products,” *Journal of Culinary Science & Technology*, vol. 6, pp. 105-118, 2008.
- [7] T. Leena, S. GP, V. RC, J. SK, M. LK e M. SM, “Infrared heating in food processing: An overview,” *International Journal of Chemical Studies*, vol. 8, pp. 327-336, 2020.
- [8] H. Sakai N, “Applications and advances in far-infrared heating in Japan,” *Trends Food Sci Technol*, vol. 5, pp. 357-362, 1994.
- [9] C. Skjöldebrand, “Infrared heating,” em *Thermal Technologies in Food Processing*, 2001, pp. 208-228.
- [10] C. J. P. a. A. U. Hermann, “Innovative hybrid oven for the in-store baking sector,” *Innovative hybrid oven for the in-store baking sector - Baking Bisc*, pp. 38-41, 2012.
- [11] C. a. A. C. Skjöldebrand, “A comparison of infrared bread baking and conventional baking,” *A comparison of infrared bread baking and conventional baking*, pp. 91-101, 1989.
- [12] K. K. H. K. J. S. I. J. a. D. A. Krishnamurthy, “Infrared heating in food processing: an overview.,” *Comp. Rev. Food Sci. Food* 7, vol. 7, pp. 2-13, 2008.
- [13] V. a. D. A. Jovicic, “VCB based baking oven concept efficient, innovative and flexible,” *Systematical analysis for qualification of applicability of innovative bake oven technique by means of volumetric ceramic burner (VKB) adjustable wavelength spectrum as well as higher dynamic response and energy efficiency*, vol. 1, pp. 10-17, 2018.
- [14] A. Z.-R. B. B. a. A. D. Vojislav Jovicic, “Role of Individual Heat Transfer Mechanisms Within a Model Baking Oven Heated by Porous Volumetric Ceramic Burners,” *Role of Individual Heat*

Transfer Mechanisms Within a Model Baking Oven Heated by Porous Volumetric Ceramic Burners, p. 16, 15 October 2020.

- [15] L. C. & A. V. Noriega, “Intelligent user interface for multi-purpose oven using infrared heating for reduced cooking time”. Miami, FL(US) & Querétaro (MX) Patente US 7,323,663 B2, 11 August 2005.
- [16] Ceramicx, “Ceramicx Infrared Industrial Solutions,” 02 2020. [Online]. Available: https://www.ceramicx.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2021/02/hw_case_studies_a4_003_compressed.pdf. [Acedido em 18 02 2022].
- [17] Ceramicx, “Estudo de caso: Forno de teste de material,” [Online]. Available: <https://ceramicxsolutions.com/industries/other/material-test-oven/>. [Acedido em 02 2022].
- [18] A. Latiers, E. D. Jaeger e L. Meurs, “Residential demand management and distribution grid impact assessment,” *Residential demand management and distribution grid impact assessment*, 06 2015.
- [19] Ceramicx, “ceramicxsolutions.com,” 12 2021. [Online]. Available: <https://ceramicxsolutions.com/information/support/why-infrared-types-of-heat-transfer/>. [Acedido em 16 02 2022].
- [20] C. GW., “Long-Wve Optics: Principles,” em *Long-Wve Optics: Principles*, Michigan, Michigan: Academic Press, 1984, p. 790.
- [21] P. - F. I. f. Good, “Puratos.pt,” [Online]. Available: <https://www.puratos.pt/pt>. [Acedido em 02 2022].
- [22] M. Ashcroft, “Improving the efficiency of bakery ovens - case study,” [Online]. Available: <https://c2e2.unepccc.org/wp-content/uploads/sites/3/2016/03/cts402-improving-efficiency-of-bakery-ovens-0.pdf>. [Acedido em Outubro 2022].
- [23] “Horecatiger,” [Online]. Available: <https://horecatiger.eu/en-eu>. [Acedido em 12 Outubro 2022].
- [24] “Role of Individual Heat Transfer Mechanisms Within a Model Baking Oven Heated by Porous Volumetric Ceramic Burners,” *Role of Individual Heat Transfer Mechanisms Within a Model Baking Oven Heated by Porous Volumetric Ceramic Burners*, p. 16, 2020.
- [25] maxima, “maxima,” [Online]. Available: <https://maxima.com/pt/equipamento-de-cozinha/forno-de-conveccao/>. [Acedido em 29 Outubro 2022].

