

Desenvolvimento de Sistemas Industriais: Desinfecção UVC e Robótica Industrial – Estágio na STREAK

Relatório de Estágio apresentado para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – Área de Especialização em Automação e
Comunicações em Sistemas Industriais

Autor

Mickael Santos

Orientadores

Doutor Fernando José Pimentel Lopes

Doutor Inácio de Sousa Adelino da Fonseca

Professores do Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Supervisor na Empresa

Engenheiro Sérgio Correia

STREAK, Lda.

Coimbra, maio, 2017

AGRADECIMENTOS

A realização deste Relatório de Estágio não teria sido possível sem a colaboração de inúmeras pessoas, que direta ou indiretamente, me ajudaram e motivaram para conseguir alcançar os meus objetivos académicos. Assim, gostaria de mostrar aqui o meu apreço e agradecimento sincero a todas elas.

À STREAK – Engenharia em Automação, Lda., especialmente ao Engenheiro Sérgio Correia e ao Engenheiro Filipe Raimundo, por me concederem a oportunidade de realizar o Estágio Curricular, facultando-me todas as condições necessárias para a concretização do mesmo. Obrigado pela vossa hospitalidade e pela confiança que depositaram em mim, em todas as tarefas que me foram atribuídas. Agradeço ainda por toda a experiência e conhecimentos que me transmitiram, tendo contribuído muito para o profissional que sou hoje.

Ao Professor Fernando José Pimentel Lopes e ao Professor Inácio de Sousa Adelino da Fonseca, pela orientação e apoio durante a elaboração deste relatório e pela disponibilidade e dedicação que demonstraram.

À minha namorada Marília Teixeira, ao meu irmão Lionel Santos e aos meus amigos Edmundo Soares e Bruno Vieira, pela paciência, apoio e motivação prestada. Sem vocês não teria sido possível ultrapassar esta fase da minha vida.

Por último, mas não menos importante, agradeço à minha mãe Fernanda Francisco, por ser uma fonte de inspiração que me tornou no homem que sou hoje, pelo que lhe dedico esta obra.

A todas estas pessoas o meu sincero obrigado.

Mickael Santos

RESUMO

O presente Relatório de Estágio pretende descrever o trabalho desenvolvido pelo autor durante o seu estágio curricular no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Área de Especialização em Automação e Comunicações em Sistemas Industriais, na empresa STREAK – Engenharia em Automação, Lda.

A empresa STREAK tem como principal objetivo criar soluções na área da Automação Industrial e do Controlo de Processos. De forma a serem competitivas, estas soluções envolvem sempre a investigação, desenvolvimento e aplicação das tecnologias mais inovadoras nas áreas a que se destinam.

No decorrer das atividades da empresa surgiu a oportunidade e a necessidade da elaboração de dois projetos principais. O primeiro projeto consistiu no desenvolvimento de um sistema de desinfeção industrial inteligente. O segundo consistiu na estruturação e na programação de um robô industrial. O primeiro teve como objetivo a construção de um sistema de desinfeção utilizando uma lâmpada germicida ultravioleta com ajuste dinâmico de radiação, de forma a maximizar a eficiência energética e a compensar a redução de emissão ultravioleta com o envelhecimento da lâmpada. O segundo projeto elaborado representa um passo muito importante para a empresa, uma vez que viria a servir de base ao desenvolvimento da sua primeira máquina industrial utilizando um robô industrial.

Neste relatório apresenta-se em primeiro lugar um estudo sobre a tecnologia da desinfeção recorrendo a radiação ultravioleta. Foi identificado o problema de engenharia e definiu-se uma arquitetura para o sistema de desinfeção. Adicionalmente, projetou-se, desenvolveu-se e testou-se um balastro eletrónico com variação de potência com características específicas para esta aplicação. Os testes do sistema desenvolvido demonstram que este satisfaz as especificações e cumpre os objetivos estabelecidos.

Para enquadrar o projeto associado ao robô, é apresentado inicialmente um estudo na área da robótica industrial. Por imposição do cliente, o robô usado é da empresa KUKA. Assim, foram estudadas as características do robô a implementar na máquina e o seu método de configuração, programação e comunicação com dispositivos externos. Seguiu-se a programação e a integração do robô na máquina. A implementação deste robô industrial e da máquina final foram completadas com sucesso, encontrando-se nesta data em pleno funcionamento numa unidade industrial em Espanha.

Para além dos projetos já mencionados, o autor participou em diversos outros projetos da empresa, como por exemplo no desenvolvimento de um novo *website* para a empresa e a programação de consolas e PLCs Schneider. Participou ainda nas atividades regulares de manutenção e apoio a clientes da empresa.

No final deste relatório são apresentadas algumas considerações finais e conclusões sobre o estágio realizado.

Palavras-chave: Desinfeção UVC; Balastro; Automação; Robótica Industrial.

ABSTRACT

The present Internship Report aims to describe the work developed by the author during his internship in the scope of the Master Degree in Electrical Engineering - Automation and Communications in Industrial Systems Specialization Area, in the company STREAK – Automation Engineering.

STREAK has as its main objective to create solutions in the area of Industrial Automation and Process Control. In order to be competitive, these solutions always involve the investigation, the development and the application of the most innovative technologies in the areas they target.

In the course of the company's activities, surfaced the opportunity and the need to elaborate two main projects. The first project consisted in the development of an intelligent industrial disinfection system. The second consisted in structuring and programming an industrial robot. The first project objective was to build a disinfection system using an ultraviolet germicide lamp with dynamic radiation adjustment, in order to maximize the energy efficiency and to compensate the reduction of ultraviolet emission with the aging of the lamp. The second project represents a very important step for the company, since it would serve as the basis for the development of its first industrial machine using an industrial robot.

This report firstly presents a study on disinfection technology using ultraviolet radiation. The engineering problem was identified and an architecture for the disinfection system was defined. In addition, a dimming electronic ballast with specific characteristics for this application was designed, developed and tested. The tests of the ballast demonstrate that it meets the specifications and the established objective.

To establish the framework for the second project, a study in the area of industrial robotics is initially presented. By imposition of the client, the robot used in this project is from KUKA. The characteristics of the robot to be used in the machine and its method of configuration, programming and communication with external devices were studied. It followed the programming and the integration of the robot in the machine. The implementation of the industrial robot and the final machine were completed successfully, being on this date in full operation in an industrial unit in Spain.

In addition to the projects described above, the author participated in several other projects, such as the development of a new website for the company and the programming of HMIs and PLCs from Schneider. He also participated in the company's regular maintenance and customer support activities.

At the end of this report, final considerations on the internship are presented, together with a set of conclusions.

Key-words: UVC Disinfection, Electronic Ballast, Automation, Industrial Robotics.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xvii
SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Apresentação da empresa.....	2
1.3 Objetivos principais	2
1.4 Outros projetos desenvolvidos.....	3
1.5 Organização do documento	4
2 Tecnologias industriais para desinfecção por UVC.....	5
2.1 Luz ultravioleta e radiação UVC	5
2.2 Dispositivos emissores de radiação UVC	6
2.3 Vantagens e desvantagens da radiação UVC para desinfecção.....	11
2.4 Aplicações de desinfecção ultravioleta.....	12
2.5 Constituição e funcionamento de dispositivos de desinfecção de água	13
3 Desenvolvimento de um balastro eletrónico para sistema de desinfecção UVC.....	15
3.1 Proposta de arquitetura para sistema de desinfecção industrial UVC	16
3.2 Lâmpada germicida ultravioleta	16
3.3 Princípio de funcionamento de um balastro eletrónico.....	17
3.4 Circuito RLC série ressonante	20
3.5 Aplicação de conceitos no circuito real	22
3.6 Circuito integrado para controlo do balastro eletrónico	24
3.6.1 Modo UVLO (<i>Under-Voltage Lock-Out</i>) e alimentação do circuito integrado .	29
3.6.2 Modo pré-aquecimento e ignição (PH/IGN)	30
3.6.3 Modo <i>dimming</i> (DIM)	31

3.6.4	Proteção <i>non-ZVS</i> (<i>Zero Voltage Switching</i>)	31
3.6.5	Proteção de sobre-corrente (<i>Crest Factor</i>).....	32
3.6.6	Modo de falha e reinício da lâmpada	32
3.7	Escolha dos componentes.....	32
3.8	Circuito aplicado do balastro eletrônico.....	35
3.9	Cálculo dos componentes do circuito de ressonância	36
3.9.1	Cálculo da componente fundamental de entrada	38
3.9.2	Cálculo dos componentes e parâmetros de funcionamento	42
3.10	Simulação do circuito com resistência da lâmpada constante.....	47
3.10.1	Simulação LTSpice	48
3.10.2	Simulação MatLab	51
3.11	Construção e teste do balastro eletrônico	56
3.12	Processamento dos dados adquiridos	59
3.13	Simulação MatLab com função obtida.....	61
3.14	Comparação de resultados experimentais com resultados da simulação MatLab.....	63
4	Programação e comissionamento de uma célula robotizada	67
4.1	História da robótica industrial	67
4.2	Robótica industrial no presente	68
4.3	Vantagens e desvantagens da robótica industrial	69
4.4	Aplicações de robótica industrial	69
4.5	Robô industrial aplicado no projeto	69
4.6	Interface de segurança X11	72
4.7	Software de configuração e programação “WorkVisual”	74
4.8	“SmartPad” KUKA	76
4.9	Modos de operação do robô	78
4.10	Tipos de programação dos robôs KUKA	78
4.11	Configuração inicial do robô.....	79
4.11.1	Dados da máquina.....	79
4.11.2	Opções de hardware	80
4.11.3	Calibração dos eixos	80
4.11.4	Calibração das ferramentas	80
4.11.5	Calibração das bases	80

4.11.6	Configuração das comunicações	81
4.12	Comunicação PROFINET	81
4.13	Configuração de entradas e saídas	82
4.14	Programação do robô	82
4.15	Implementação da célula robotizada no cliente	86
5	Conclusões	87
5.1	Balastro eletrónico	87
5.2	Célula robotizada industrial	87
5.3	Considerações finais	88
	Referências bibliográficas	89
	Anexos.....	91
	Anexo I – <i>Datasheet</i> IRS2530D International Rectifier.....	93
	Anexo II – <i>Datasheet</i> Lâmpada PHILIPS - TUV 36T5 HO 4P SE UNP.....	95
	Anexo III – Exemplo dos ficheiros Excel com os valores instantâneos das correntes e tensões adquiridas no teste do protótipo.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Espectro eletromagnético ultravioleta, adaptado de [1].	5
Figura 2.2 - Representação do ADN após ser submetido a radiação UVC, adaptado de [2].	6
Figura 2.3 - Constituição de uma lâmpada fluorescente, adaptado de [3].	8
Figura 2.4 - Diferença entre lâmpada fluorescente e lâmpada germicida, adaptado de [4].	8
Figura 2.5 - Sistema de controlo básico de uma lâmpada fluorescente, adaptado de [5].	9
Figura 2.6 - Variação da eficiência das lâmpadas de descarga de vapor de sódio com a frequência, adaptado de [6].	10
Figura 2.7 - Sistema de controlo de uma lâmpada fluorescente com balastro eletrónico.	10
Figura 2.8 - Lâmpada fluorescente compacta (CFL), adaptado de [7].	11
Figura 2.9 - Dispositivo de desinfeção de água MightyPure, MP22A 6 GPM, adaptado de [8].	14
Figura 3.1 - Diagrama da arquitetura do sistema de desinfeção UVC.	16
Figura 3.2 – Lâmpada PHILIPS - TUV 36T5 HO 4P SE UNP [9].	17
Figura 3.3 - Constituição de um balastro eletrónico, adaptado de [10].	18
Figura 3.4 - Balastro eletrónico, topologia de inversor ressonante de meia ponte [10].	20
Figura 3.5 - Circuito RLC série [12].	21
Figura 3.6 - Gráfico da corrente num circuito RLC série, em função da frequência [11].	21
Figura 3.7 - Circuito de potência do balastro electrónico.	23
Figura 3.8 - Circuito simplificado do circuito de potência do balastro electrónico.	23
Figura 3.9 - Configuração dos terminais do circuito integrado IRS2530D [16].	26
Figura 3.10 - Diagrama lógico do circuito integrado IRS2530D, adaptado de [16].	27
Figura 3.11 - Circuito elétrico, recomendado pelo fabricante, para aplicação do IRS2530D [16].	28
Figura 3.12 - Circuito UVLO e de alimentação do IRS2530D [16].	29
Figura 3.13 - Diagrama de Bode do circuito de ressonância na ignição e nos vários níveis de <i>dimming</i> [16].	30
Figura 3.14 - Método de controlo <i>dimming</i> AC+DC [17].	31
Figura 3.15 - Esquema do circuito elétrico aplicado no balastro electrónico.	35
Figura 3.16 - Gráfico da tensão de alimentação do circuito de ressonância do balastro.	38
Figura 3.17 - Circuito de ressonância do balastro electrónico, adaptado de [10].	42

Figura 3.18 - Circuito aplicado na simulação LTSpice com resistência constante da lâmpada.	48
Figura 3.19 - Gráfico da simulação LTSpice da lâmpada em ignição, com $L_{res} = 1 \text{ mH}$ e $C_{res} = 10 \text{ nF}$	49
Figura 3.20 - Gráfico da simulação LTSpice da lâmpada em funcionamento, com $L_{res} = 1 \text{ mH}$ e $C_{res} = 10 \text{ nF}$	49
Figura 3.21 - Gráfico da simulação LTSpice da lâmpada em ignição, com $L_{res} = 0,8 \text{ mH}$ e $C_{res} = 10 \text{ nF}$	50
Figura 3.22 - Gráfico da simulação LTSpice da lâmpada em funcionamento, com $L_{res} = 0,8 \text{ mH}$ e $C_{res} = 10 \text{ nF}$	50
Figura 3.23 - Circuito de ressonância do balastro: a) Circuito completo; b) Circuito simplificado.	51
Figura 3.24 - Fluxograma do programa MatLab para análise de frequência do circuito com resistência da lâmpada constante.	53
Figura 3.25 - Gráfico da simulação MatLab da lâmpada em ignição, com $L_{res} = 0,8 \text{ mH}$	54
Figura 3.26 - Gráfico da simulação MatLab da lâmpada em funcionamento, com $L_{res} = 0,8 \text{ mH}$	54
Figura 3.27 - Gráfico da simulação MatLab da lâmpada em ignição, com $L_{res} = 0,7 \text{ mH}$	55
Figura 3.28 - Gráfico da simulação MatLab da lâmpada em funcionamento, com $L_{res} = 0,7 \text{ mH}$	56
Figura 3.29 - Fotografia do circuito elaborado do balastro eletrónico.	57
Figura 3.30 - Fotografia da indutância construída para o circuito do balastro eletrónico.	57
Figura 3.31 - Esquema de ligações do balastro eletrónico.	58
Figura 3.32 - Gráfico dos valores eficazes do teste do balastro, com base na Tabela 3.2.	60
Figura 3.33 - Fluxograma do programa MatLab para análise de frequência do circuito com resistência da lâmpada dinâmica.	62
Figura 3.34 - Gráfico dos valores eficazes do teste do balastro.	64
Figura 3.35 - Gráfico dos valores eficazes da simulação MatLab do balastro.	64
Figura 4.1 - Primeiro robô industrial "Unimate" [24].	68
Figura 4.2 - Diagrama dos componentes e ligações do robô KUKA, adaptado de [23].	70
Figura 4.3 - Painel de conexão da unidade de controlo KR C4 COMPACT, adaptado de [23].	71
Figura 4.4 - Esquema de ligações da Interface de segurança X11 [23].	73
Figura 4.5 - Interface gráfica de utilizador do software "WorkVisual".	75
Figura 4.6 - Janela de seleção e criação de projetos "WorkVisual".	75

Figura 4.7 - Vista frontal do "smartPAD", adaptado de [23].	76
Figura 4.8 - "SmartPad": a) Vista traseira; b) Interface de utilizador; adaptado de [23].	77
Figura 4.9 - Janela de configuração PROFINET do software WorkVisual.	81
Figura 4.10 - Interfaces da "Mão Central" do robô KUKA Agilus, adaptado de [23].	82
Figura 4.11 - Fluxograma do programa "MAIN.SRC".	84
Figura 4.12 - Fluxograma do programa "SPS.SUB".	85
Figura 4.13 - Fotografia da célula robotizada instalada numa unidade industrial em Espanha.	86

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação de dispositivos emissores de UVC.....	7
Tabela 3.1 - Comparação de circuitos integrados para controlo de balastros eletrónicos.....	25
Tabela 3.2 - Valores eficazes do teste do balastro, em função da frequência.	59

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

AC – *Alternate Current*

ADN – *Ácido Desoxirribonucleico*

AVAC – *Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado*

CF – *Crest Factor*

CFL – *Compact Fluorescent Lamp*

CMS – *Content Management System*

CSV – *Comma Separated Values*

EMD – *Electronic Mastering Device*

EMI – *Electromagnetic Interference*

FIFO – *First In, First Out*

HMI – *Human Machine Interface*

KRL – *KUKA Robot Language*

KTL – *Kathoden-Tauch Lackierung*

LED – *Light Emitting Diode*

MOSFET – *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

PLC – *Programmable Logic Controller*

PUMA – *Programmable Universal Machine for Assembly*

TCP – *Tool Center Point*

TCP/IP – *Transmission Control Protocol / Internet Protocol*

UV – *Ultraviolet*

UVC – *Ultraviolet C*

UVGI – *Ultraviolet Germicidal Irradiation*

UVLO – *Under-Voltage Lock-Out*

VAC – *Volts of Alternating Current*

VCC – *Voltage at the Common Collector*

ZVS – *Zero Voltage Switching*

1 Introdução

Este é o capítulo introdutório onde figurará o contexto e a motivação que permitem enquadrar os problemas em estudo e os objetivos a atingir. Neste capítulo é ainda apresentada a empresa onde decorreu o estágio, assim como a estrutura deste documento.

1.1 Contexto e motivação

A história diz-nos que os pensadores da antiguidade nunca duvidaram que, sob condições favoráveis, era possível surgir vida de forma espontânea. E com a invenção do telescópio ficou muito clara a existência de seres vivos não visíveis a olho nu, a que se deu o nome de micro-organismos.

Com a chegada da medicina moderna, a preocupação com a limpeza, higiene, boas condições ambientais e alimentares ganhou uma grande importância, pois leva a um decréscimo da taxa de mortalidade sem intervenções médicas. Mais recentemente, esta preocupação está relacionada com questões de saúde pública, tais como, doenças autoimunes, bioterrorismo, epidemias de gripe, entre outras, pelo que têm sido intensificados os esforços para prevenir o contágio, que é principalmente feito pelo ar, água potável, alimentação, etc. Devido a esta preocupação, reapareceu o interesse na investigação de irradiação germicida ultravioleta (UVGI – *Ultraviolet Germicidal Irradiation*) depois de décadas de subutilização e abandono. Com este novo interesse apareceram também novas questões relacionadas com a sua eficiência e segurança.

A UVGI é uma técnica vastamente utilizada para desinfeção de ar e água e evita que sejam utilizados agentes químicos, tais como, cloro, ozono e outros oxidantes. Tem sido utilizada em hospitais, laboratórios e indústrias alimentícias, farmacêuticas, cosméticas, entre outras. Este método consiste na irradiação de luz ultravioleta UVC (*Ultraviolet light range C – short-wave*) que possui um comprimento de onda entre 290 nm e 100 nm no espectro não visível. Esta gama tem a capacidade de danificar o ADN (Ácido Desoxirribonucleico) de micro-organismos, tais como, bactérias e vírus. Deste modo a radiação UVC inativa os micro-organismos, interfere com a capacidade de se reproduzirem e pode inclusive matá-los.

Usualmente são utilizadas lâmpadas de descarga de mercúrio a baixa pressão para emitir radiação UVC com um comprimento de onda de 254 nm. Este tipo de lâmpadas tem o mesmo funcionamento das lâmpadas fluorescentes comuns, pelo que necessitam de um dispositivo, normalmente designado de balastro, para funcionarem corretamente. Este balastro pode ser eletromagnético ou eletrónico, sendo que a melhor opção é o eletrónico, pois é mais eficiente e permite colocar a lâmpada à sua potência máxima.

Um dos projetos em que a empresa que acolheu este estágio estava envolvida no período de estágio era o desenvolvimento de uma máquina para desinfeção UVC. Assim, uma componente fundamental do projeto era o desenvolvimento do respetivo balastro.

Outra das atividades principais da empresa é o desenvolvimento de máquinas industriais, verificando-se atualmente uma introdução crescente de robótica industrial nas aplicações de automação em geral e nas máquinas industriais em particular.

A robótica industrial surgiu para satisfazer uma necessidade da indústria. Antes da sua aparição, muitas tarefas repetitivas e cansativas eram realizadas por pessoas. Estas tarefas passaram a ser realizadas por robôs industriais que conseguem ter melhor desempenho. Um robô industrial típico tem como referência o braço humano, que permite grande flexibilidade de movimentos. Atualmente, a robótica industrial é aplicada massivamente na indústria e continua em crescimento, existindo cada vez mais processos industriais em que é aplicada.

No período de estágio a empresa que acolheu este estágio encontrava-se a desenvolver a sua primeira máquina industrial utilizando um robô industrial. Assim, o segundo projeto apresentado neste relatório está associado à robótica industrial.

1.2 Apresentação da empresa

O estágio foi realizado na empresa STREAK – Automação em Engenharia, Lda. A STREAK foi fundada em setembro de 2002 e tem como principal objetivo criar soluções em automação industrial e controlo de processos. Nesse sentido, tem vindo a desenvolver a sua atividade nas seguintes áreas:

- *Software* de automação e supervisão;
- Projeto de engenharia;
- Instalação;
- Base de dados de gestão de energia/produção;
- Reconversão de sistemas industriais;
- Sistemas de controlo de qualidade.

A empresa encontra-se dividida em vários departamentos que são geridos pela administração. Os departamentos existentes são os Recursos Humanos, Financeiro, Comercial, Engenharia e Qualidade. Devido à sua especificidade técnica, o Departamento de Engenharia encontra-se subdividido em três áreas sendo estas o Projeto Mecânico, Projeto de Automação e Produção.

1.3 Objetivos principais

O principal objetivo deste estágio foi a obtenção de uma primeira experiência profissional na área da Automação e Sistemas Industriais. Deste modo, foram desenvolvidos dois projetos de investigação e implementação, com o objetivo de satisfazer as necessidades de possíveis clientes da empresa.

O objetivo do primeiro projeto foi a investigação e o desenvolvimento de um sistema de desinfeção de água através de radiação ultravioleta germicida. Assim, foi projetado um tanque com entrada e saída de água com uma lâmpada UVC de descarga de mercúrio a baixa pressão submersa, utilizando um tubo de quartzo para proteção. Este tanque terá ainda um fluxómetro

para medir o caudal da água e um sensor de UVC para medir a potência efetiva da radiação emitida pela lâmpada.

A lâmpada é controlada por um balastro eletrónico com variação de potência que será regulada por uma entrada analógica de 0 a 10 volts. Deste modo, o balastro pode ser controlado por qualquer PLC (*Programmable Logic Controller*).

Será desenvolvido um controlador para o sistema com saída analógica, para controlar a lâmpada, e com entrada para o fluxómetro e para o sensor de UVC. Este controlador terá ainda comunicação ModBus TCP/IP para poder comunicar com outros dispositivos, tal como PLCs ou computadores. O objetivo deste controlador é compensar o envelhecimento da lâmpada, fazendo com que a lâmpada emita sempre a sua potência máxima de radiação. Este controlador irá regular a intensidade da lâmpada de acordo com o caudal no tanque, de modo a economizar energia.

Assim, o primeiro objetivo deste estágio consistiu no desenvolvimento do balastro eletrónico com variação de potência, que é o componente mais complexo a desenvolver, visto que não existe nenhum balastro no mercado que corresponda às especificações necessárias.

O segundo objetivo principal deste estágio foi a programação de um robô industrial para integrar uma máquina em desenvolvimento para um cliente concreto. Esta foi a primeira máquina produzida pela STREAK, Lda. com uma célula robotizada.

Outros objetivos complementares do estágio foram a participação em outras atividades da empresa dando apoio a vários projetos em desenvolvimento e às atividades regulares de manutenção. Destes projetos adicionais, destacou-se o desenvolvimento de um novo e melhorado *website* para a empresa.

1.4 Outros projetos desenvolvidos

Na STREAK – Engenharia em Automação, Lda. foram desenvolvidos vários projetos e atividades complementares que serão resumidos em seguida.

Uma das atividades em que o estagiário participou foi a cablagem de quadros elétricos para vários projetos. Esta atividade consistia na ligação de quadros elétricos, seguindo o esquema. Estas ligações tinham que ser feitas de forma crítica, uma vez que nem sempre a implementação prática podia ser feita exatamente de acordo com a descrição teórica, sendo depois necessário a alteração do esquema elétrico para futura consulta.

Numa outra atividade, o estagiário participou numa formação sobre PLCs e consolas Schneider adquirindo conhecimentos sobre a sua programação e sobre a comunicação entre eles, assim como sobre a comunicação com autómatos e consolas de outros fabricantes.

Foi desenvolvido pelo estagiário um novo e melhorado *website* para a empresa, tendo como objetivo a fácil gestão por parte de pessoas sem conhecimentos de programação. Assim foi utilizado o GetSimple CMS que é um sistema de gestão de conteúdos. Este sistema é instalado ao copiar um conjunto de ficheiros para o servidor da página *web*. Em seguida, ao escrever o nome da página seguido de “/admin”, neste caso “streak.pt/admin”, temos uma página de autenticação através de um nome de utilizador e palavra-passe que, em seguida, reencaminha

para uma página de gestão onde é possível gerir todos os conteúdos do *website* de forma simples e intuitiva.

O visual da página *web* é escolhido na interface de administrador, onde já existem vários temas disponíveis. Para que o visual da página esteja de acordo com a identidade da empresa, foi adotado um novo tema executado em HTML, CSS e PHP. Assim, foi possível criar uma página moderna que revelasse a identidade e filosofia da empresa e que fosse de fácil gestão, não sendo necessário, para a sua gestão corrente, qualquer programação no futuro.

1.5 Organização do documento

Este documento encontra-se dividido em cinco capítulos:

- O Capítulo 1 (capítulo presente) contém a introdução a este Relatório de Estágio, a contextualização dos projetos, a apresentação da empresa, os objetivos do estágio e os projetos desenvolvidos, assim como esta organização do documento;
- O Capítulo 2 apresenta um estudo das tecnologias industriais para desinfecção UVC, as suas vantagens, desvantagens e aplicações;
- O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento de um balastro eletrónico específico para um sistema de desinfecção UVC, o estudo das tecnologias necessárias ao seu desenvolvimento, a escolha dos componentes, os testes e os resultados obtidos;
- O Capítulo 4 contém um estudo resumido sobre células robotizadas industriais, a sua história, as suas vantagens e desvantagens e as suas aplicações. Neste capítulo apresenta-se ainda a programação e comissionamento de uma célula robotizada, correspondente ao projeto desenvolvido pela empresa, as suas configurações, as suas comunicações e o seu comissionamento;
- O Capítulo 5 e último apresenta as considerações finais e as conclusões sobre o trabalho desenvolvido no estágio curricular;
- No final deste relatório encontram-se ainda as referências bibliográficas e um conjunto de três anexos. No Anexo I encontra-se o *datasheet* do circuito integrado usado no projeto e no Anexo II o *datasheet* da lâmpada germicida selecionada para a máquina de desinfecção. No Anexo III são apresentados valores de medidas de correntes e tensões nos testes do protótipo do balastro desenvolvido.

2 Tecnologias industriais para desinfeção por UVC

2.1 Luz ultravioleta e radiação UVC

A luz ultravioleta é uma forma de luz invisível ao olho humano e encontra-se no espectro eletromagnético entre a luz visível e os raios X. Está compreendida entre os comprimentos de onda de 10 nm e 400 nm. O Sol é a fonte natural primária de radiação ultravioleta, mas a atmosfera filtra a maior parte da sua energia, deixando passar apenas uma pequena porção do espectro. O espectro UV, apresentado na Figura 2.1, pode ser subdividido nas seguintes gamas:

- UVA (entre 400 nm e 320 nm) é a gama mais comum e também pode ser chamada de luz negra. Esta é a luz que produz o efeito de escurecimento nos pigmentos da pele, também conhecido como bronzeado. Se a exposição for excessiva pode causar queimaduras e até cancro da pele. Por outro lado, esta radiação é necessária aos humanos para sintetizarem vitamina D. Apenas uma pequena porção desta radiação é absorvida pela atmosfera;
- UVB (entre 320 nm e 280 nm), também designada como onda média, é a gama mais destrutiva. Pode levar a queimaduras graves e cancro da pele. A camada de ozono absorve grande parte desta radiação, daí existir uma grande preocupação, pois a sua redução pode aumentar a prevalência de cancro da pele;
- UVC (entre 280 nm e 200 nm) nunca é observada na natureza, pois é absorvida completamente pela atmosfera. Esta gama é designada de germicida, pois tem a capacidade de inativar micro-organismos, como vírus ou bactérias. Nos seres humanos, esta radiação é absorvida pelas camadas mortas externas da epiderme. No entanto, a exposição prolongada pode provocar irritação da pele e infeções oculares.
- VUV ou Vacuum UV (entre 200 nm e 10 nm) tem este nome pois é absorvida pelo oxigénio que se encontra no ar, sendo que se propaga livremente no vácuo. É normalmente utilizado em investigação científica e nalguns tipos de lasers.

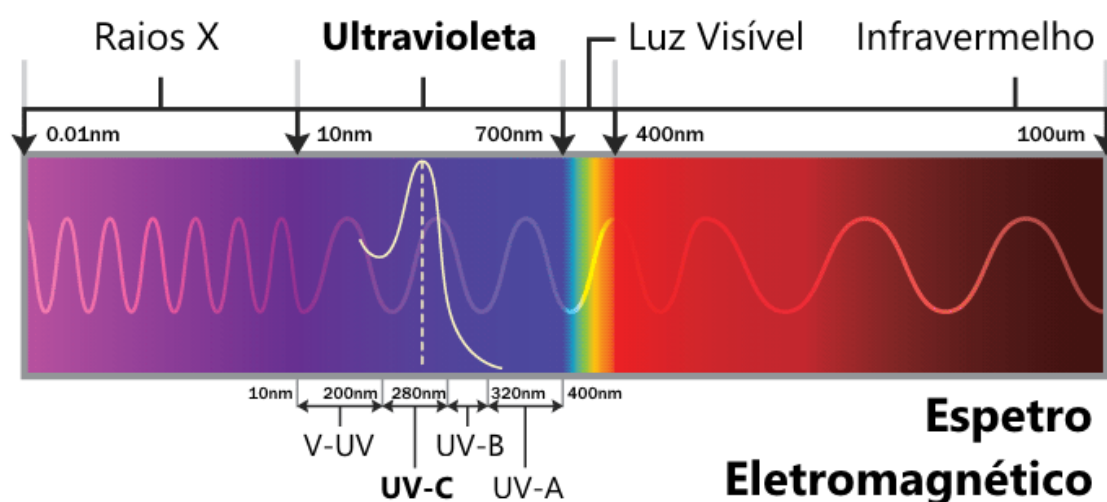


Figura 2.1 - Espectro eletromagnético ultravioleta, adaptado de [1].

O espectro dos UVC é o destaque deste projeto. A radiação UVC é conhecida como germicida e tem sido aplicada na indústria em processos de desinfecção. Esta gama do espectro eletromagnético, principalmente no intervalo de 250 nm a 270 nm, tem a característica única de inativar e eliminar micro-organismos, tais como vírus e bactérias. Quando uma célula é submetida a uma radiação UVC ocorre o seguinte processo, que se encontra representado na Figura 2.2:

- A radiação UVC penetra a parede celular;
- A energia dos fótons UVC é absorvida pelas proteínas e pelo ADN da célula;
- A luz UVC danifica a estrutura proteica;
- O ADN sofre uma alteração química, quebrando as suas ligações moleculares. Isto provoca uma divisão celular que inativa o micro-organismo inabilitando a sua reprodução, levando por fim à sua morte.

Os organismos incapazes de metabolizar e reproduzir-se não causam doenças. A eficiência desta radiação depende da intensidade da radiação, do tempo de exposição, da presença de partículas que possam proteger os micro-organismos e da sua capacidade de suportar tal radiação.

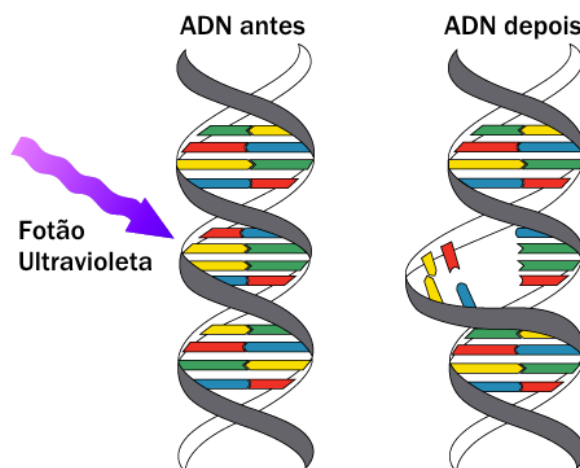


Figura 2.2 - Representação do ADN após ser submetido a radiação UVC, adaptado de [2].

2.2 Dispositivos emissores de radiação UVC

Com base nos efeitos relatados anteriormente, foi necessário criar emissores de radiação UVC para ser possível a desinfecção utilizando este processo. Atualmente, os emissores que se destacam neste processo são o UVC LED e a lâmpada de descarga de vapor de mercúrio.

Os UVC LED são díodos emissores de luz que apenas produzem radiação com comprimento de onda de aproximadamente 265 nm. Esta tecnologia teve um grande crescimento recentemente, devido à necessidade de uma alternativa livre de mercúrio. Estes LED têm uma grande durabilidade, dimensões muito reduzidas e são muito eficientes.

Lâmpada de descarga de vapor de mercúrio UVC, também chamada de lâmpada germicida, é muito similar às lâmpadas que conhecidas como lâmpadas fluorescentes. Emite no comprimento de onda de 254 nm e é uma tecnologia bem desenvolvida em virtude dos anos de existência. Consegue emitir radiação com potências elevadas, sendo ideal para grandes áreas. A Tabela 2.1 compara estes dois tipos de emissores.

Tabela 2.1 - Comparação de dispositivos emissores de UVC.

	UVC LED	Lâmpada Germicida
Comprimento de onda	Preciso	Disperso
Ecológico	Sim	Contêm mercúrio
Arranque	Instantâneo	Necessita de algum tempo para atingir a sua potência máxima
Resistência	Robusto e de fácil manuseio	Frágil com possibilidade de quebra
Arquitetura	Tamanho reduzido sendo versátil para cada aplicação	Arquitetura fixa tendo que se adaptar a aplicação à lâmpada
Durabilidade	Elevada durabilidade	Substituição da lâmpada anualmente
Potência	Baixa potência	Elevada potência
Produção	Processo de produção mais complexo	Tecnologia bem desenvolvida com processo de fabricação simples
Custo	Elevado custo	Baixo Custo

Analisando a Tabela 2.1 pode-se concluir que o LED tem mais vantagens que a lâmpada. No entanto, a lâmpada germicida tem vantagens com peso elevado devido ao seu baixo custo e elevada potência, tornando-se uma candidata mais viável para utilização na indústria. O UVC LED é majoritariamente utilizado em sistemas reduzidos e de baixa potência. Atualmente, em processos de desinfecção UV, a indústria utiliza majoritariamente lâmpadas germicidas. No entanto, não significa que num futuro próximo não passem a ser utilizados UVC LED.

Como já foi mencionado anteriormente, as lâmpadas germicidas são muito similares às lâmpadas que conhecemos como lâmpadas fluorescentes. São ambas lâmpadas de descarga de vapor de mercúrio, com algumas diferenças.

As lâmpadas fluorescentes têm como encapsulamento um tubo de vidro revestido com fósforo, como representado na Figura 2.3. Este tubo contém um gás inerte e mercúrio. Em cada extremidade encontra-se um eletrodo em forma de filamento. Estes filamentos têm como objetivo aquecer o interior da lâmpada para diminuir a tensão de ionização do gás. Depois de a lâmpada estar quente é aplicada uma tensão de centenas de volts que vai criar uma descarga iônica entre os eletrodos. O mercúrio evapora e ocorre a emissão de luz ultravioleta. Esta radiação vai excitar o fósforo na parede do tubo levando à emissão de luz visível. Depois de ocorrer a descarga apenas são necessários cerca de 100 volts, dependendo da lâmpada, para manter o fluxo de elétrons.

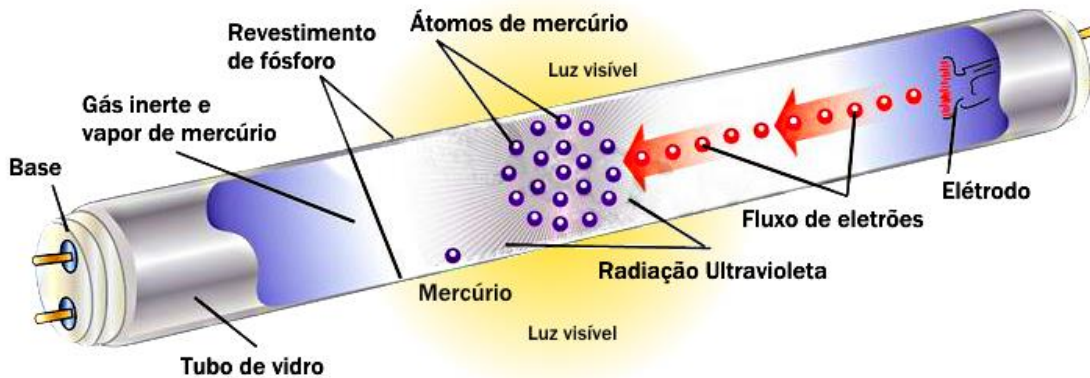


Figura 2.3 - Constituição de uma lâmpada fluorescente, adaptado de [3].

Este tipo de lâmpada comporta-se como uma resistência negativa em funcionamento. Isto significa que quanto maior a corrente que flui através dela, menor a sua resistência, provocando um aumento da corrente, e assim sucessivamente. Este comportamento provoca uma reação em cadeia que acaba por destruir a lâmpada. Para resolver este problema é necessário um dispositivo para limitar a corrente na lâmpada.

Deste modo, são necessárias três etapas para o arranque e funcionamento de uma lâmpada fluorescente:

- Aplicar uma corrente nos filamentos para aquecer o interior da lâmpada;
- Depois de a lâmpada estar quente, aplicar entre os eletrodos a tensão necessária para ionizar o gás e iniciar a descarga;
- Quando se iniciar o fluxo de elétrons deve ser limitada a corrente que flui através da lâmpada.

As lâmpadas germicidas também são lâmpadas de descarga de vapor de sódio, no entanto, em vez de um tubo de vidro, o seu encapsulamento é de quartzo. Isto porque o vidro absorve a radiação ultravioleta, enquanto o quartzo torna a emissão de radiação ultravioleta o mais eficiente possível. A utilização de um revestimento com fósforo torna-se desnecessária, visto que o propósito destas lâmpadas é apenas emitir luz ultravioleta. Assim, o seu objetivo é emitir radiação UVC para desinfeção, sendo este objetivo concretizado pela emissão de radiação com um comprimento de onda de 254 nm. Na Figura 2.4 encontra-se uma representação destes dois tipos de lâmpadas.

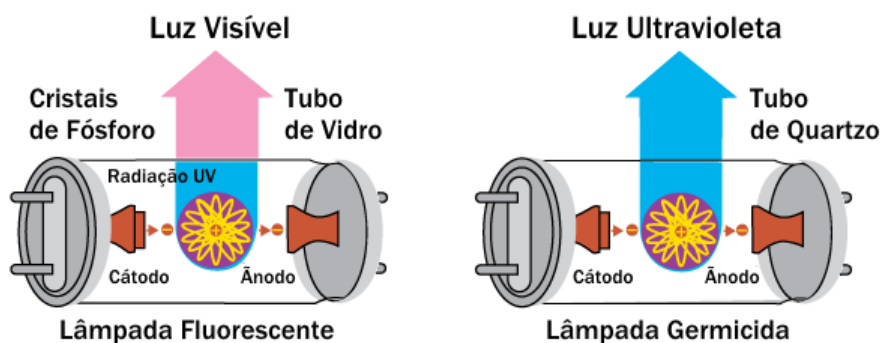


Figura 2.4 - Diferença entre lâmpada fluorescente e lâmpada germicida, adaptado de [4].

Para ambas as lâmpadas é necessário um dispositivo de controlo que execute as três etapas mencionadas anteriormente. Para solucionar este problema, o primeiro sistema a surgir utilizava dois componentes, o balastro eletromagnético e o arrancador, apresentados na Figura 2.5. O balastro não passa de uma bobine que está em série com a lâmpada. O arrancador é um relé térmico biestável e encontra-se em paralelo com a lâmpada. Quando a lâmpada se encontra desligada, a sua resistência é infinita. Isto cria um arco elétrico no arrancador, aquecendo a lâmina bimetálica, fechando o circuito. Assim, irá fluir corrente nos filamentos, aquecendo o interior da lâmpada. Quando o arrancador arrefece, o circuito é aberto interrompendo instantaneamente o fluxo de corrente no balastro. O campo magnético na bobine colapsa, criando uma variação brusca da corrente ao descarregar a energia armazenada. Esta variação de corrente cria a tensão elevada necessária para a ionização do gás, dando-se a descarga na lâmpada. A lâmpada entra em funcionamento e o balastro limita a sua corrente agindo como um elemento resistivo do circuito. O Arrancador deixa de ser necessário até ao próximo arranque.



Figura 2.5 - Sistema de controlo básico de uma lâmpada fluorescente, adaptado de [5].

Os balastros eletromagnéticos funcionam na tensão de linha a 50/60 Hz. A cada meio ciclo fazem o arranque da lâmpada e limitam a sua corrente. Apesar de serem de baixo custo e alta fiabilidade, têm algumas limitações devido à sua operação a baixa frequência. Primeiramente, têm normalmente uma grande dimensão e peso. Outra limitação deve-se ao facto das lâmpadas de descarga terem uma constante de tempo de aproximadamente um milissegundo, que é menor que meio ciclo da tensão de linha (8.3 ms para 60 Hz e 10 ms para 50 Hz). Isto causa a extinção do arco e arranque da lâmpada a cada passagem da tensão por zero. O resultado é um maior desgaste dos filamentos e cintilação visível da lâmpada. Finalizando, não existe nenhuma forma eficiente e de baixo custo para regular a potência da lâmpada.

Todas estas limitações levaram ao estudo da utilização de corrente alternada de alta frequência para alimentar lâmpadas de descarga. A utilização de alta frequência reduz o tamanho e o peso do balastro e também melhora a performance da lâmpada. Deixa de existir a extinção e arranque da lâmpada a cada meio ciclo, mantendo sempre o gás ionizado. Isto leva a um aumento significativo da eficiência da lâmpada e reduz o desgaste nos filamentos. O arranque da lâmpada é mais rápido e deixa de existir cintilação e ruído audível. Além destas vantagens, ainda é possível incorporar no balastro regulação de potência da lâmpada.

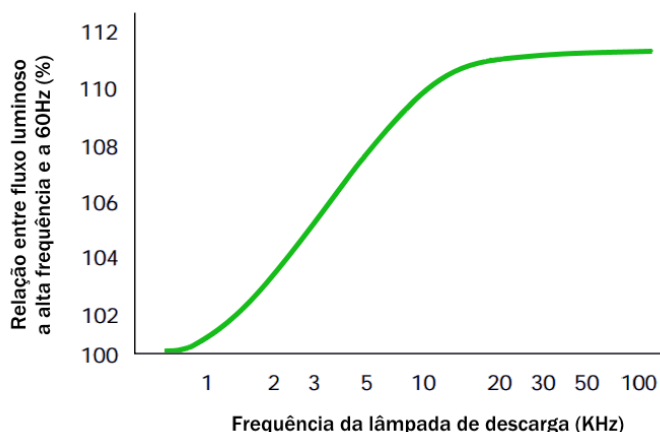


Figura 2.6 - Variação da eficiência das lâmpadas de descarga de vapor de sódio com a frequência, adaptado de [6].

O gráfico da Figura 2.6 apresenta uma comparação entre a eficiência luminosa relativa a baixa frequência e a frequências entre 1 kHz e 100 kHz. Podemos concluir que quanto maior a frequência, maior é a eficiência de lâmpada. No entanto, a partir de 20 kHz a eficiência mantém-se quase constante. Com isto em mente, a frequência de funcionamento destes balastos é sempre igual ou superior a 20 kHz. Utilizar esta gama de frequências também elimina o ruído gerado pelo balastro, pois encontra-se acima do espectro audível.

Os balastos que utilizam altas frequências são designados de balastos eletrónicos. A sua aplicação é bastante simples, pelo que apenas são ligados os quatro pinos da lâmpada e a alimentação de corrente alternada ao balastro. Estas ligações encontram-se representadas na Figura 2.7.



Figura 2.7 - Sistema de controlo de uma lâmpada fluorescente com balastro eletrónico.

Como já foi dito anteriormente, os balastos eletrónicos têm um tamanho muito reduzido. Esta característica levou ao aparecimento das CFL (*Compact Fluorescent Lamp*), que são lâmpadas fluorescentes compactas (Figura 2.8). O seu objetivo é substituírem as lâmpadas incandescentes, tendo o mesmo formato, o mesmo fluxo luminoso, mas um consumo menor.

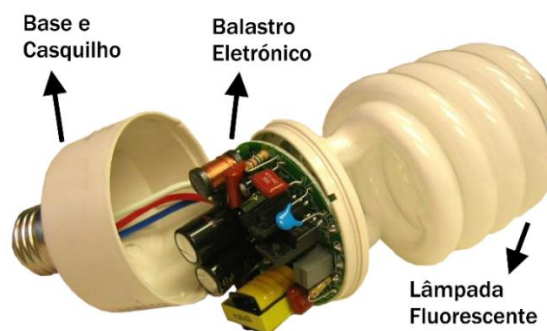


Figura 2.8 - Lâmpada fluorescente compacta (CFL), adaptado de [7].

2.3 Vantagens e desvantagens da radiação UVC para desinfecção

Em processos de desinfecção existem outros métodos que não utilizam radiação UVC. Esses processos têm o nome de desinfecção química e são conseguidos pela adição de produtos químicos, tais como cloro, cloraminas, dióxido de cloro ou ozono. Estes químicos têm que ter um determinado nível durante um período de tempo adequado para atingir a desinfecção. Estes processos de desinfecção química funcionam muito bem com bactérias e vírus, mas têm uma eficácia limitada com protozoários. Também é de destacar que a maioria destes químicos têm limites regulamentados por lei.

A desinfecção ultravioleta não altera a qualidade do produto a desinfetar, logo não está sujeita a qualquer regulamentação de dosagem. Estudos recentes demonstraram que a radiação UVC é eficaz contra a maioria das bactérias, vírus e protozoários. Enquanto a desinfecção química danifica apenas a estrutura celular dos micro-organismos, a desinfecção por UVC tem como alvo o seu ADN, inativando-os e retirando a sua capacidade de reprodução.

Isto levou a utilização de UVGI (*Ultraviolet Germicidal Irradiation*) a ser utilizada em vários processos industriais em que fosse necessária desinfecção, visto ter um grande número de vantagens comparativamente a outros métodos. No entanto, não deixa de ter algumas desvantagens.

Vantagens da desinfecção ultravioleta:

- Desinfecção UV é eficaz na inativação da maioria das bactérias, vírus e protozoários;
- É um processo físico em vez de químico, o que elimina a necessidade de gerar, manusear, transportar e armazenar químicos corrosivos ou tóxicos. Isto leva a uma diminuição dos custos e ao aumento da segurança dos operadores e da comunidade envolvente;
- O processo é livre de químicos, sendo que o produto é apenas exposto a luz ultravioleta, pelo que não deixa resíduos e não muda a cor, sabor ou aroma do produto. É inofensivo aos humanos;
- Tem um tempo de contacto mais curto comparado com outros desinfetantes (aproximadamente 20 a 30 segundos para lâmpadas de baixa pressão);
- O equipamento utilizado não ocupa muito espaço;

- É seguro e de fácil operação e manutenção, pelo que a formação é minimizada ou até desnecessária;
- Os custos operacionais consistem na substituição anual da lâmpada e no consumo elétrico.

Desvantagens da desinfeção ultravioleta:

- Uma pequena dosagem pode não inativar alguns micro-organismos;
- Os organismos podem, por vezes, reparar ou reverter os efeitos destrutivos da radiação UVC através de um processo chamado “*photo reactivation*” ou, na ausência de luz com um processo chamado “*dark repair*”;
- Dependendo da aplicação, pode ser necessária manutenção preventiva para evitar a obstrução da luz emitida pela lâmpada;
- Se existirem partículas a obstruírem a passagem da luz, estas podem tornar a desinfeção ineficaz.

2.4 Aplicações de desinfeção ultravioleta

A desinfeção através de radiação UVC oferece uma solução simples, segura e de baixo custo. As suas aplicações são infinitas, pelo que se tornou a escolha mais popular para a indústria. A esterilização de ar, desinfeção de superfícies e tratamento de água são as três áreas principais de aplicação de desinfeção ultravioleta. Dentro destas áreas existem várias aplicações que variam com a indústria em que se encontram.

A desinfeção ultravioleta pode ser utilizada para controlo de odor, esterilização, e eliminação de compostos orgânicos voláteis e gases de escape industriais. Em algumas instituições, tais como hospitais, a qualidade do ar é crucial para um ambiente saudável. A radiação UVC purifica o ar de micro-organismos que causam doenças e contaminantes que agravam asma e outras doenças respiratórias. O uso de luz ultravioleta no controlo de odores tem muitas aplicações, incluindo plantas, estufas agrícolas e cozinhas comerciais. A sua utilização também é relevante na purificação de ar em indústrias onde são produzidos químicos nocivos e tóxicos, tal como plástico e borracha. Em seguida encontram-se várias aplicações industriais de esterilização de ar com luz ultravioleta:

- Assistência médica;
- Sistemas AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) comerciais, industriais, hospitalares e residenciais;
- Agricultura;
- Cozinhas industriais;
- Indústria de plástico, borracha, etc.

A desinfeção de superfícies ultravioleta evita a utilização de químicos, o que é crucial em muitas indústrias. Na indústria alimentar a desinfeção ultravioleta é utilizada para matar vírus e bactérias em segundos, aumentando o tempo de vida e valor nutricional dos alimentos. Existe uma grande quantidade de indústrias que necessita deste tipo de desinfeção, tais como:

- Processamento de alimentos (processamento, armazenamento, manuseio, produção, padarias, restaurantes, talhos);
- Limpeza de salas;
- Indústria da biotecnologia (laboratórios de investigação, equipamento de esterilização, testes médicos, bioengenharia, genética, processos farmacêuticos);
- Agricultura (plantações).

A luz ultravioleta pode ser aplicada para tornar a água segura em piscinas e Spas e eliminar a necessidade de cloro que pode ter efeitos nocivos e irritativos. Também pode ser usada na aquicultura, no estudo da biologia e em processos de tratamento de água. Os métodos tradicionais de tratamento e desinfecção podem ser pouco saudáveis e nocivos para o ambiente. O tratamento de água por ultravioletas é amigo do ambiente e, em alguns casos, mais eficiente, pelo que existem múltiplas aplicações:

- Piscinas e Spas;
- Aquicultura;
- Estudo da biologia;
- Tratamento de água (águas residuais, municipais e residenciais, água potável, processamento de água industrial e comercial);
- Descarga de água em barcos.

2.5 Constituição e funcionamento de dispositivos de desinfecção de água

Existe uma grande variedade de dispositivos para desinfecção de água através de radiação ultravioleta no mercado. Estes dispositivos existem para aplicações industriais, comerciais e até domésticas. Na Figura 2.9 está apresentado um dispositivo para pequenas aplicações da empresa americana *Atlantic Ultraviolet Corporation*. Esta empresa é especializada em produtos de desinfecção ultravioleta para consumidores pequenos e médios. Este dispositivo é da gama *MightyPure* e o seu modelo é MP22A 6 GPM.

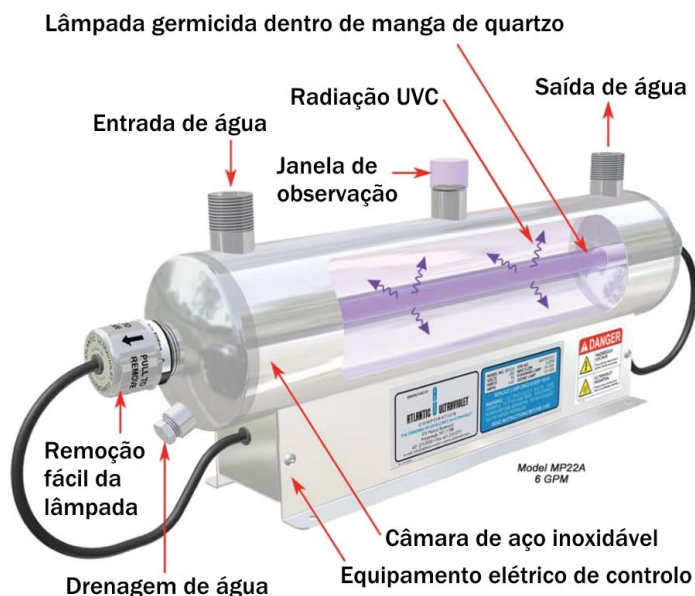


Figura 2.9 - Dispositivo de desinfecção de água MightyPure, MP22A 6 GPM, adaptado de [8].

Na Figura 2.9 encontra-se o dispositivo com os vários elementos identificados. É constituído por uma câmara de aço inoxidável onde se encontra a lâmpada germicida dentro da manga de quartzo. Esta câmara tem uma entrada e saída de água e uma tampa que torna fácil a remoção da lâmpada. Também contém uma tampa para drenagem de água, caso seja necessário. Debaixo da câmara encontra-se o equipamento de controlo da lâmpada.

A água entra na câmara de aço inoxidável e flui no espaço em anel entre a manga de quartzo e a parede da câmara. A lâmpada emite a radiação UVC desinfetando a água. É possível verificar o bom funcionamento da lâmpada através da janelinha de observação que se encontra acima da câmara. Ao sair da câmara, a água encontra-se desinfetada, estando assim disponível para uso. Em algumas situações pode ser necessário um filtro a montante do dispositivo para eliminar impurezas na água que possam interferir com o processo de desinfecção ultravioleta.

Neste capítulo apresentaram-se as tecnologias industriais mais comuns para desinfecção por UVC. Descreveu-se em particular a utilização de lâmpadas de descarga com radiação ultravioleta. No Capítulo 3, no âmbito de um projeto em curso na empresa onde decorreu o estágio, é proposta uma arquitetura para um sistema de desinfecção industrial UVC e é descrito detalhadamente o desenvolvimento de um balastro eletrónico com características específicas, para funcionar com uma lâmpada específica, a usar numa máquina de desinfecção UVC de acordo com a arquitetura proposta.

3 Desenvolvimento de um balastro eletrónico para sistema de desinfeção UVC

Este capítulo apresenta o processo de desenvolvimento de um balastro eletrónico com variação de potência para uma lâmpada germicida ultravioleta. O objetivo deste balastro é integrar um produto a desenvolver pela empresa onde decorreu o estágio.

A empresa tem a intenção de criar uma solução industrial de desinfeção de água através de emissão de radiação ultravioleta. O Capítulo 2 apresentou a evolução deste tipo de tecnologias e os produtos existentes no mercado. Tendo em conta essas soluções, existe uma lacuna que a STREAK, Lda. pretende preencher. Visto que as lâmpadas utilizadas nestes sistemas são de vapor de mercúrio de baixa pressão, o seu envelhecimento causa uma redução de eficiência e uma correspondente redução da potência da radiação emitida. A solução a desenvolver, recorrendo a um sensor UVC, pretende garantir que a radiação emitida é a estipulada pelo sistema, mesmo que seja necessário ultrapassar a potência nominal da lâmpada. Este sistema também permite, recorrendo a um fluxómetro, emitir a radiação necessária para a desinfeção da água a fluir pelo sistema, de forma a poupar energia.

O Subcapítulo 3.1 apresenta a arquitetura completa da solução a criar. Do conjunto de tecnologias necessárias, o aspeto mais complexo do sistema é o desenvolvimento de um balastro eletrónico com *dimming*, específico para a lâmpada a aplicar. A opção óbvia seria a aquisição de um balastro. No entanto, não existe no mercado um balastro com as características necessárias. Os restantes componentes do sistema apresentam tecnologia bem conhecida pela empresa e pelo estagiário, pelo que, no âmbito do mestrado, pretendeu-se concentrar o esforço no projeto de desenvolvimento e teste do balastro. No Subcapítulo 3.2 apresentam-se as características da lâmpada utilizada neste sistema.

Os seguintes subcapítulos deste capítulo apresentam todo o desenvolvimento efetuado para se chegar ao objetivo final: construção de um balastro eletrónico com ajuste de potência adequado à lâmpada UVC utilizada.

Estudou-se o princípio de funcionamento de um balastro eletrónico e de todas as partes que o constituem, incluindo a dedução da função de transferência do seu circuito de potência. Foi escolhido o circuito integrado principal e componentes associados para controlar o sistema. Calculou-se também os componentes que constituem o circuito de ressonância do sistema.

Com base nos componentes escolhidos anteriormente, realizou-se uma simulação do sistema projetado utilizando dois *softwares* diferentes, LTSpice e MatLab. Em seguida construiu-se o balastro eletrónico e realizaram-se diversos testes para obter dados experimentais. Estes dados foram processados de forma a obter uma função que relacionasse a resistência da lâmpada e a corrente que por ela flui. Esta função foi aplicada à função de transferência do sistema e implementada no *software* MatLab. Por fim, os resultados dos testes experimentais foram comparados com os resultados da simulação em MatLab, validando o balastro desenvolvido e permitindo apresentar as conclusões finais deste projeto.

3.1 Proposta de arquitetura para sistema de desinfecção industrial UVC

Na Figura 3.1 encontra-se um diagrama da arquitetura proposta para o sistema de desinfecção industrial UVC.

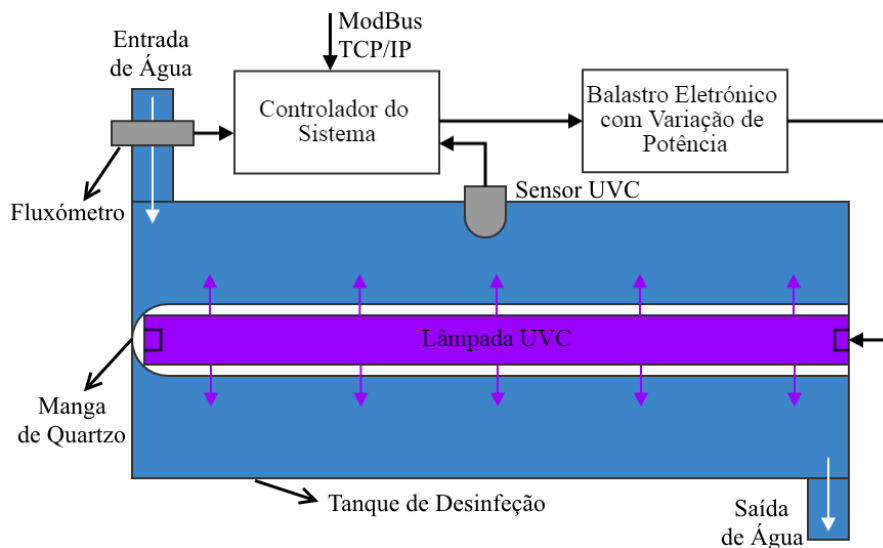


Figura 3.1 - Diagrama da arquitetura do sistema de desinfecção UVC.

O diagrama da Figura 3.1 apresenta um tanque por onde irá fluir a água. Este tanque contém uma entrada e uma saída de água. No centro do tanque encontra-se uma lâmpada de ultravioletas, dentro de uma manga de quartzo. Esta manga permite isolar a lâmpada da água sem por em causa a radiação emitida pela mesma. Existem dois sensores neste sistema, um sensor de radiação UVC dentro do tanque e um fluxómetro para medir o caudal à entrada do tanque. Estes sensores encontram-se ligados ao controlador do sistema. Terá que ser definida uma relação entre o caudal e a radiação UVC a emitir, para que toda a água do tanque seja desinfetada com sucesso. Assim, o controlador do sistema irá controlar o balastro para que a radiação emitida corresponda ao caudal de água a entrar no sistema. O controlador terá ainda uma comunicação ModBus TCP/IP para comunicação com dispositivos externos, tal como PLCs, para enviar informação relativa ao sistema, e também receber sinais de controlo.

3.2 Lâmpada germicida ultravioleta

A lâmpada para o sistema foi selecionada de acordo com os seguintes critérios:

- Emissão de radiação UVC de 20 W ou mais;
- Acesso aos dois terminais de cada filamento para aquecimento antes do arranque;
- Todos os terminais dos filamentos têm de se encontrar fisicamente em apenas um dos lados da lâmpada, devido à configuração do tanque de desinfecção;
- Tipo de lâmpada T5, que indica uma eficiência elevada e um diâmetro de 15,9 mm;
- Comprimento da lâmpada superior a 700 mm e inferior a 900 mm.

Deste modo, a lâmpada escolhida para o sistema foi da PHILIPS, e a sua referência é TUV 36T5 HO 4P SE UNP (Figura 3.2) (Anexo II).



Figura 3.2 – Lâmpada PHILIPS - TUV 36T5 HO 4P SE UNP [9].

Esta lâmpada cumpre os requisitos do sistema de desinfecção e apresenta as seguintes características elétricas:

- Potência nominal consumida: 75 W;
- Tensão nominal: 97 V;
- Corrente nominal: 0,8 A;
- Radiação UVC nominal: 25 W.

É necessário ter em atenção que estas características apenas são válidas para baixas frequências (50 Hz) e podem diferir para outras frequências.

Para funcionar com esta lâmpada, existem no mercado vários balastos eletrónicos possíveis, mas nenhum deles contém a característica mais importante, a possibilidade de variação dinâmica de potência, também referido como *dimming*. Isto acontece porque a variação de potência é mais comum em lâmpadas de menor potência, para aplicações não industriais.

3.3 Princípio de funcionamento de um balastro eletrónico

O balastro eletrónico é dos elementos mais importantes deste projeto. Devido à lâmpada germicida utilizada não ser comum, o único balastro compatível é o IUV-2S60-M4-LD, do mesmo fabricante que a lâmpada. Este balastro não tem regulação, não sendo ideal para o projeto. Assim, houve a necessidade de desenvolver, construir e testar um balastro eletrónico específico para esta aplicação.

A Figura 3.3 mostra um diagrama de um balastro eletrônico típico.

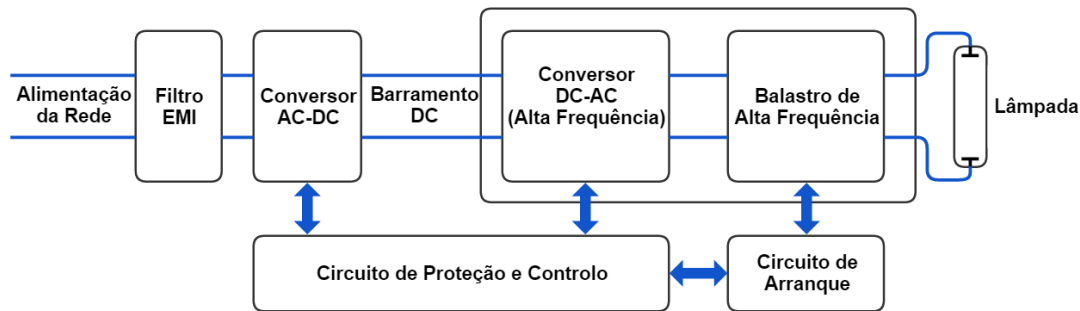


Figura 3.3 - Constituição de um balastro eletrônico, adaptado de [10].

Os elementos principais são os seguintes [10]:

- **Filtro EMI:** este filtro é obrigatório para balastros eletrônicos comerciais. Usualmente consiste em duas bobinas acopladas e um condensador. Este filtro de entrada é utilizado para atenuar a interferência eletromagnética (EMI – *Electromagnetic Interference*) gerada pelos elementos de alta frequência do balastro. Também protege o balastro contra possíveis harmônicos da rede.
- **Conversor AC-DC:** este elemento é utilizado para gerar uma tensão DC elevada a partir da alimentação da rede, que é 230 V, 50 Hz na Europa. Normalmente, este conversor é constituído por uma ponte de díodos retificadora seguida de um condensador. Este tipo de retificador é simples, no entanto resulta num baixo fator de potência do circuito. É possível, utilizando conversores ativos, obter um fator de potência elevado e uma tensão de barramento regulada.
- **Conversor DC-AC e balastro de alta frequência:** estes elementos têm como função gerar uma onda sinusoidal de alta frequência e, ao mesmo tempo, limitar a corrente da lâmpada. Para executar esta função podem ser usados condensadores e bobines, tendo como vantagem o seu reduzido tamanho e peso, pois estão a operar a altas frequências.
- **Circuito de arranque:** para ser feito o arranque de uma lâmpada de descarga de baixa pressão é necessária uma tensão bastante elevada, comparada com a tensão de operação. Assim, o circuito de arranque é necessário para gerar esta tensão, até se dar a ignição da lâmpada.
- **Circuito de controlo e proteção:** este elemento inclui o oscilador principal, amplificadores de erro para regulação de tensão e potência, proteção contra sobretensão de saída, controlo de tempo de ignição, proteção contra sobre-corrente, deteção de falha de lâmpada, etc. Este elemento pode ser constituído por circuitos muito simples, mas também pode ser mais complexo incluindo um microprocessador. Usualmente, os circuitos com regulação de potência (*dimming*) incluem um microprocessador.

Quando é projetado um balastro eletrônico, existem vários aspetos importantes a ter em atenção:

- **Frequência de operação:** como já foi referido anteriormente, a frequência de operação deve estar acima de 20 kHz. Isto evita que o balastro gere ruído audível e aumenta em grande proporção a eficiência do mesmo. Por outro lado, altas frequências produzem maiores perdas de comutação. O limite prático da frequência de comutação é de aproximadamente 100 kHz utilizando MOSFETs como comutadores. Normalmente é recomendado não utilizar frequências entre 30 a 40 kHz, pois podem gerar ruído em

aparelhos que utilizem comandos por infravermelhos. Este não é o caso, pois a lâmpada vai ser utilizada num ambiente industrial, no interior de uma câmara isolada.

- Forma de onda da corrente: de forma a maximizar a vida útil da lâmpada do sistema, é importante que esta seja alimentada por uma corrente alternada simétrica, dando uso a ambos os elétrodos alternadamente. Outro fator importante é o *Crest Factor* (CF) da corrente da lâmpada, que é o rácio entre o valor de pico e o valor *Root Mean Square* (RMS), ou valor eficaz. Quanto maior for o CF, menor será a vida útil da lâmpada. A situação ideal é alimentar a lâmpada com uma corrente sinusoidal pura, que apresenta um CF de $\sqrt{2} \cong 1,4$. Para evitar o envelhecimento precoce da lâmpada é recomendado um CF menor que 1,7.
- Procedimento de ignição da lâmpada: o bom desempenho do arranque da lâmpada é muito importante para garantir uma longa vida útil. Os filamentos devem estar a uma temperatura de aproximadamente 800° C antes de ser aplicada a tensão de arranque. Deste modo é possível reduzir significativamente a tensão de ignição o que reduz o desgaste nos filamentos, aumentando a vida útil da lâmpada.
- Regulação de intensidade da lâmpada (*dimming*): esta é uma característica importante, pois permite que o balastro controle a potência da lâmpada e assim, a intensidade da radiação emitida. A técnica utilizada é a variação da frequência de comutação, que afeta a impedância do balastro, variando a corrente de descarga. A variação da frequência deve ser feita de forma suave, de modo a evitar mudanças súbitas de potência. Quando a lâmpada se encontra desligada o arranque deve ser feito à potência nominal, e só então é que a lâmpada pode ser ajustada para a potência desejada.

Existem dois tipos de balastros: não ressonantes e ressonantes. Usualmente, os balastros não ressonantes geram ondas quadradas e por vezes com uma componente DC, o que reduz drasticamente a vida útil da lâmpada. Nestes balastros também surgem picos de tensão e elevadas perdas de comutação, reduzindo a eficiência da lâmpada. Assim, estes são normalmente utilizados em dispositivos portáteis e de emergência, em que a potência da lâmpada é baixa e o número de ignições esperado é reduzido. No âmbito do projeto, o balastro ideal será do tipo ressonante.

Os balastros ressonantes utilizam um circuito chamado “*Resonant Tank*”, que consiste numa bobine e num condensador. Este circuito consegue elevar a tensão, de forma a ser possível obter a tensão de ignição e filtra harmónicos de elevada ordem, sendo possível obter uma corrente aproximadamente sinusoidal através da lâmpada. Existem várias topologias de balastros ressonantes pelo que a utilizada neste projeto é o inversor ressonante de meia ponte, que se encontra representado na Figura 3.4.

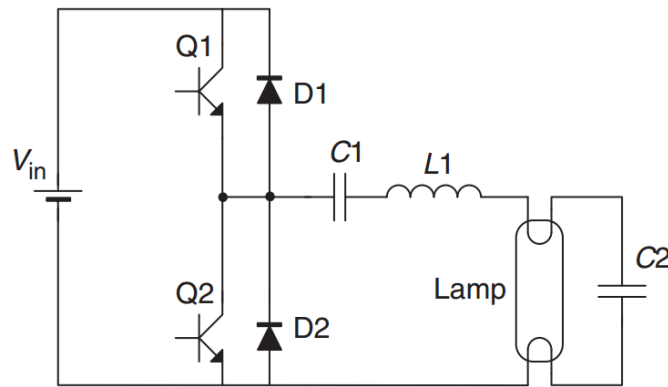


Figura 3.4 - Balastro eletrônico, topologia de inversor ressonante de meia ponte [10].

Atualmente, a maioria dos fabricantes produz balastros alimentados por tensão, sobretudo em aplicações alimentadas por corrente alternada da rede. A tensão DC é obtida através de retificadores de onda completa. É gerada uma onda quadrada comutando os transistores Q1 e Q2 com um *Duty Cycle* de 50% para alimentar o circuito ressonante série. O circuito ressonante filtra os harmônicos de elevada ordem, alimentando a lâmpada com uma corrente sinusoidal. A vantagem deste circuito é a facilidade em atingir elevadas tensões para a ignição utilizando frequências próximas da ressonância. O condensador C1 é utilizado para filtrar a componente DC de onda quadrada. L1 e C2 constituem o circuito ressonante, visto que a lâmpada desligada tem uma resistência quase infinita. Assim, é possível obter elevadas tensões devido ao alto fator Q de ressonância. Depois da ignição da lâmpada a sua resistência é muito reduzida, pelo que o fator Q é muito baixo devido ao paralelo com o condensador.

3.4 Circuito RLC série ressonante

Para perceber o funcionamento deste circuito é necessário entender primeiro o funcionamento de um circuito ressonante. Um circuito ressonante, também conhecido nesta situação como circuito RLC, é um circuito elétrico constituído por uma resistência (R), uma bobine (L) e um condensador (C), ligados em série ou em paralelo. No caso de um balastro deste tipo tem-se uma associação de série e paralelo, mas como os componentes mais relevantes são a bobine e o condensador iremos analisar o circuito em série [11]. Existem dois parâmetros fundamentais para descrever o comportamento de um circuito ressonante: a frequência de ressonância e o fator Q ou Fator de Qualidade.

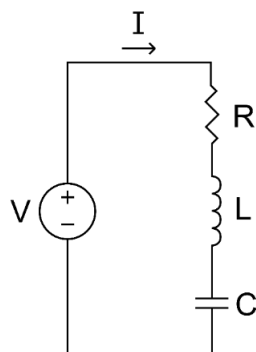


Figura 3.5 - Circuito RLC série [12].

Na Figura 3.5 encontra-se o circuito RLC série em que V é uma fonte de tensão sinusoidal de frequência f . A ressonância ocorre quando a impedância complexa Z_{LC} é igual a zero. Assim, é possível obter a frequência de ressonância utilizando a Eq. (3.3), que tem como base a Eq. (3.1) e a Eq. (3.2).

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (3.1)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.2)$$

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \Leftrightarrow Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (3.3)$$

Assim, o menor valor de Z é quando Z_{LC} é igual a zero, como se pode verificar no desenvolvimento da Eq. (3.4).

$$\begin{aligned} Z_{LC} = X_L - X_C = 0 &\Leftrightarrow X_L = X_C \Leftrightarrow \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \Leftrightarrow \omega_0^2 LC = 1 \\ \sqrt{\omega_0^2 LC} = \sqrt{1} &\Leftrightarrow \omega_0 \sqrt{LC} = 1 \Leftrightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Leftrightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Na Figura 3.6 é possível observar a resposta em frequência da corrente no circuito RLC série.

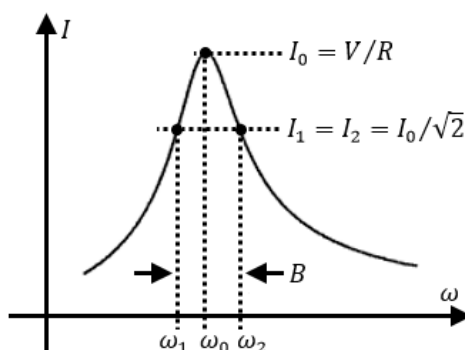


Figura 3.6 - Gráfico da corrente num circuito RLC série, em função da frequência [11].

Este gráfico é suportado pela Eq. (3.5) que nos retorna o valor do módulo da corrente no circuito.

$$|I| = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L - 1/\omega \cdot C)^2}} \quad (3.5)$$

Isto significa que a potência máxima no circuito surge quando este se encontra em ressonância, sendo o seu valor dado pela Eq. (3.6).

$$P(\omega_0) = R \cdot I_0^2 \quad (3.6)$$

As frequências ω_1 e ω_2 são chamadas frequências de meia potência e ocorrem quando a corrente do circuito é igual a $I_0/\sqrt{2}$. Isto é provado pelo grupo de equações na Eq. (3.7).

$$\begin{aligned} P(\omega_1) = P(\omega_2) &= \frac{P(\omega_0)}{2} = R \cdot I_1^2 \\ P(\omega_0) &= R \cdot I_1^2 \cdot 2 = R \cdot I_1^2 \cdot (\sqrt{2})^2 = R \cdot (I_1 \cdot \sqrt{2})^2 \\ I_0 &= I_1 \cdot \sqrt{2} = I_2 \cdot \sqrt{2} \Leftrightarrow I_1 = I_2 = I_0/\sqrt{2} \end{aligned} \quad (3.7)$$

O valor das frequências de meia potência pode ser calculado através da Eq. (3.8).

$$\begin{aligned} Z &= \frac{V}{I_1} = \frac{V}{I_0/\sqrt{2}} = \frac{V}{V/R} \cdot \sqrt{2} = \frac{V}{V} \cdot \sqrt{2} \cdot R \Leftrightarrow Z = \sqrt{2} \cdot R \\ \sqrt{2} \cdot R &= \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \Leftrightarrow 2 \cdot R^2 = R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 \\ R^2 &= \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Assim, ao resolver a Eq. (3.8), iremos obter quatro raízes, pelo que apenas duas são válidas visto que valores negativos de frequência não fazem sentido neste contexto. As duas frequências de meia potência são apresentadas na Eq. (3.9).

$$\omega_{2,1} = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \pm \frac{R}{2L} \quad (3.9)$$

3.5 Aplicação de conceitos no circuito real

Para obtermos a relação entre a tensão aplicada na lâmpada e a frequência, temos de considerar também os filamentos da lâmpada, pelo que o nosso circuito é o apresentado na Figura 3.7.

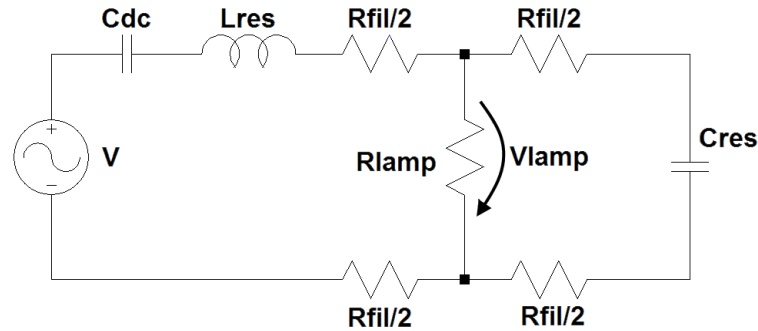


Figura 3.7 - Circuito de potência do balastro eletrônico.

Os elementos apresentados no circuito são os seguintes:

- V : Tensão de alimentação aplicada ao circuito;
- C_{DC} : Condensador para filtragem da componente DC da alimentação (também terá algum efeito no ponto de ressonância do circuito)
- L_{RES} : Bobine de ressonância;
- C_{RES} : Condensador de ressonância;
- R_{FIL} : Resistência de filamento da lâmpada;
- R_{LAMP} : Resistência da lâmpada.

Neste caso, irá ser considerado que a descarga da lâmpada se inicia e termina exatamente no centro de cada filamento [13]. Como a tensão de alimentação é de alta frequência (acima de 20 kHz), a lâmpada é considerada totalmente resistiva [14]. Assim, quando em descarga, a resistência da lâmpada, R_{LAMP} , é calculada por V_{LAMP}/I_{LAMP} . Na ausência de descarga a sua resistência é muito elevada, podendo ser considerada infinita.

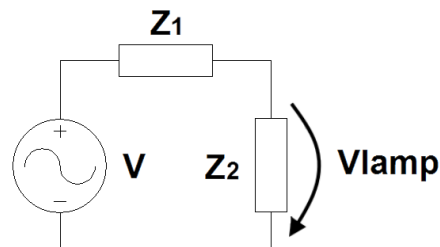


Figura 3.8 - Circuito simplificado do circuito de potência do balastro eletrônico.

A Figura 3.8 apresenta o circuito da Figura 3.7, mas simplificado, de forma a ser possível realizar o cálculo através de um divisor de tensão, como apresentado na Eq. (3.10).

$$V_{LAMP}(\omega) = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \times V(\omega) \quad (3.10)$$

Na Eq. (3.11) encontra-se a equivalência da impedância Z_1 e na Eq. (3.12) a equivalência da impedância Z_2 .

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_{DC}} + j\omega L_{RES} + \frac{R_{FIL}}{2} + \frac{R_{FIL}}{2} = \frac{1}{j\omega C_{DC}} + j\omega L_{RES} + R_{FIL} \quad (3.11)$$

$$Z_2 = R_{LAMP} // \left(\frac{R_{FIL}}{2} + \frac{1}{j\omega C_{RES}} + \frac{R_{FIL}}{2} \right) = R_{LAMP} // \left(R_{FIL} + \frac{1}{j\omega C_{RES}} \right) \quad (3.12)$$

Assim, com base na Eq. (3.10), a Eq. (3.13) apresenta a tensão da lâmpada em função da frequência angular ω e a Eq. (3.14) apresenta a tensão da lâmpada em função da frequência f .

$$V_{LAMP} = \frac{R_{LAMP} // \left(R_{FIL} + \frac{1}{j\omega C_{RES}} \right)}{\left(\frac{1}{j\omega C_{DC}} + j\omega L_{RES} + R_{FIL} \right) + \left(R_{LAMP} // \left(R_{FIL} + \frac{1}{j\omega C_{RES}} \right) \right)} \times V(\omega) \quad (3.13)$$

$$V_{LAMP} = \frac{R_{LAMP} // \left(R_{FIL} + \frac{1}{j2\pi f C_{RES}} \right)}{\left(\frac{1}{j2\pi f C_{DC}} + j2\pi f L_{RES} + R_{FIL} \right) + \left(R_{LAMP} // \left(R_{FIL} + \frac{1}{j2\pi f C_{RES}} \right) \right)} \times V(f) \quad (3.14)$$

3.6 Circuito integrado para controlo do balastro eletrónico

A regulação de intensidade (*dimming*) de uma lâmpada fluorescente a alta frequência necessita de funções adicionais que não estão incluídas em balastros eletrónicos sem *dimming* [15] [16] [17]. Estas funções incluem entrada de intensidade controlada pelo utilizador, circuitos para deteção de corrente, tensão ou potência da lâmpada, e circuito de realimentação para regulação da luminosidade da lâmpada de acordo com a entrada do utilizador. Para executar estas funções é necessário algum tipo de microprocessador de controlo. Devido a este tipo de tecnologia já existir há algum tempo no mercado, existem vários circuitos integrados específicos, com microprocessador interno, para executar todas estas funções. Os fabricantes que se destacam nesta área são a International Rectifier e a STMicroelectronics sendo que os circuitos integrados que mais se adequam para esta aplicação encontram-se na Tabela 3.1.

A Tabela 3.1 apresenta as características do IRS2530D [16], IRS2158D [18] e L6574 [19]. Estes circuitos integrados apresentam características muito semelhantes. Todos têm sistemas de proteção contra falhas, com diferentes graus de proteção entre eles, e tendo todos valores mínimos de *dimming* muito reduzidos.

Tabela 3.1 - Comparação de circuitos integrados para controlo de balastros eletrónicos.

Circuito integrado	IRS2530D	IRS2158D	L6574
Fabricante	International Rectifier	International Rectifier	STMicroelectronics
Tempo de pré-aquecimento programável	Sim	Sim	Sim
Frequência de pré-aquecimento programável	Não	Sim	Não
Frequência de funcionamento programável	Sim	Sim	Sim
MOSFET interno para <i>bootstrap</i>	Sim	Sim	Sim
Deteção de falha de ignição	Sim	Sim	Sim
Deteção de filamento aberto	Sim	Sim	Não
Proteção fim de vida útil	Não	Sim	Não
Proteção sobre corrente <i>Crest Factor</i>	Sim	Não	Não
Malha fechada para controlo <i>dimming</i>	Sim	Sim	Sim
Bloqueio de subtensão	Sim	Sim	Sim
Nível mínimo de <i>dimming</i>	10%	<10%	5%
Díodo de <i>Clamp Vcc</i>	15,6 V	15,6 V	15,6 V
Corrente mínima de arranque	250 uA	250 uA	250 uA
Tensão Máxima do circuito de potência	600V	600V	600V
<i>Deadtime</i>	2 us	1,5 us	1,25 us
Tempo de subida da saída	120 ns	120 ns	80 ns
Tempo de descida da saída	50 ns	50 ns	50 ns
Circuito envolvente	Simple	Complexo	Intermédio
Nº de pinos	8	16	16

O IRS2158D é o mais completo, permitindo manipular uma grande variedade de parâmetros de funcionamento do balastro. No entanto, este é o que necessita de mais componentes externos e que apresenta um circuito bastante mais complexo.

O IRS2530D e o L6574 são muito semelhantes em termos de funcionalidades. O L6574 tem mais terminais de ligação e necessita de um circuito envolvente mais complexo.

Deste modo, o circuito integrado IRS2530D (Anexo I) é aquele que tem o perfil mais adequado para este projeto. Existe muita informação disponível, pelo que o seu *datasheet* é muito completo, encontrando-se disponível uma grande variedade de *application notes*. Este circuito integrado é o mais recente da International Rectifier com funcionalidade de *dimming*. Encontra-se num formato compacto com 8 pinos e contém um controlador de meia ponte até 600 volts. Inclui todas as funções necessárias para pré-aquecimento, ignição e regulação de potência, assim como de proteção do circuito contra falhas da alimentação e da lâmpada. Executa todas estas funções num formato reduzido e com uma pequena contagem de componentes, sendo ainda flexível para ser utilizado com vários métodos de controlo de *dimming*.

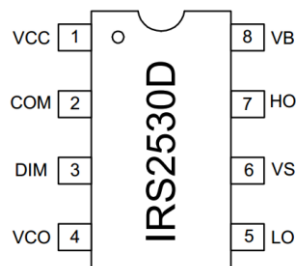


Figura 3.9 - Configuração dos terminais do circuito integrado IRS2530D [16].

A Figura 3.9 apresenta um diagrama de terminais do IRS2530, que possuem as seguintes funcionalidades:

1. VCC – Tensão de alimentação do circuito integrado;
2. COM – Referência comum de alimentação (massa) do circuito integrado;
3. DIM – Referência DC de *dimming* e entrada de realimentação de corrente AC da lâmpada;
4. VCO – Entrada de oscilador controlado por tensão (*Voltage-Controlled Oscillator*);
5. LO – Saída de controlo da *gate* inferior da meia ponte;
6. VS – Retorno de alta tensão flutuante e entrada de deteção da meia-ponte;
7. HO – Saída de controlo da *gate* superior da meia ponte;
8. VB – Alimentação flutuante do controlo de *gate* superior da meia-ponte.

A Figura 3.10 apresenta o diagrama de funcionamento lógico do circuito integrado IRS2530D.

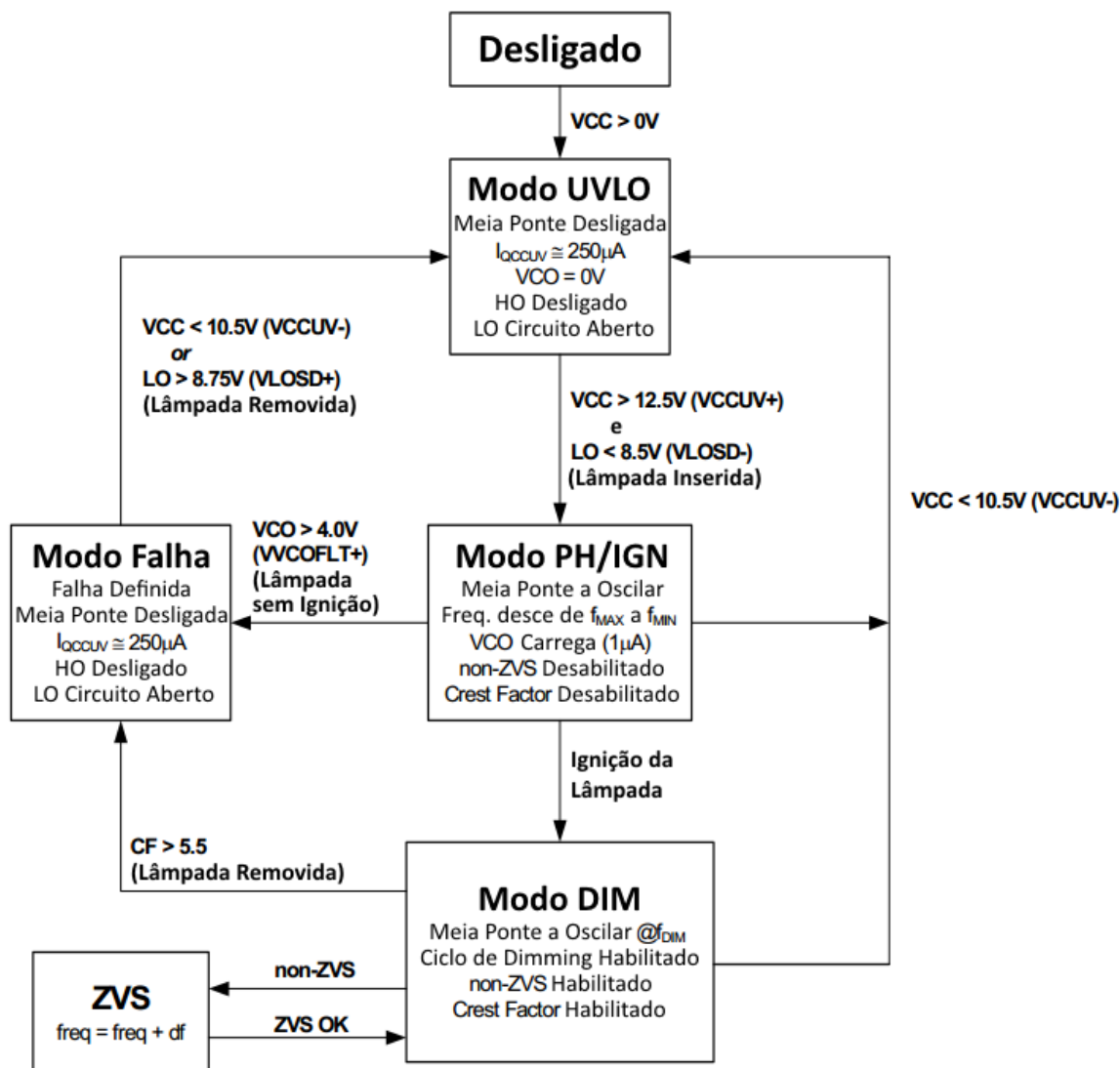


Figura 3.10 - Diagrama lógico do circuito integrado IRS2530D, adaptado de [16].

3.6.1 Modo UVLO (*Under-Voltage Lock-Out*) e alimentação do circuito integrado

Under-Voltage Lock-Out significa bloqueio de subtensão. Este modo torna-se ativo quando a alimentação V_{CC} se encontra abaixo da tensão de *threshold* do integrado, V_{CCUV+} (normalmente 12,5 volts), e quando o pino LO se encontra acima da tensão de desativação, V_{LOSD+} (normalmente 8,75 volts), indicando que a lâmpada não está inserida.

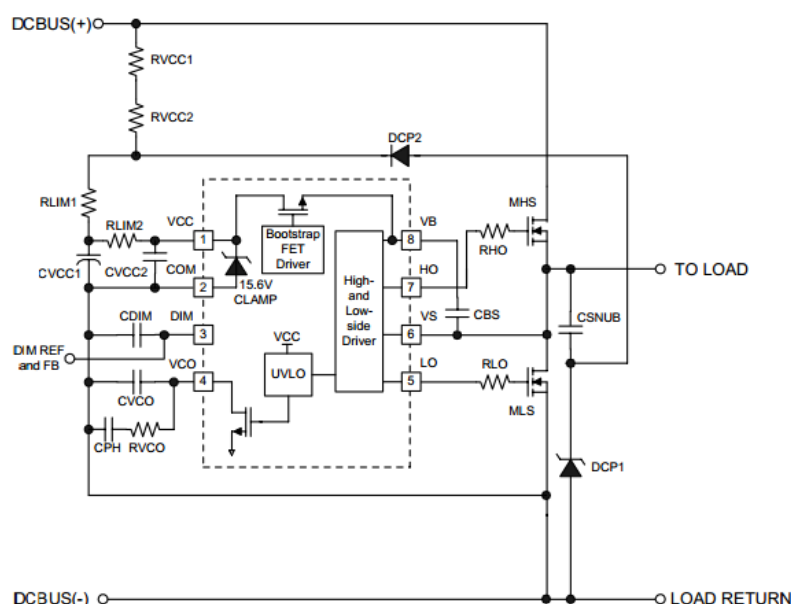


Figura 3.12 - Circuito UVLO e de alimentação do IRS2530D [16].

O circuito UVLO, apresentado na Figura 3.12, mantém uma corrente de alimentação muito baixa, $I_{QCCUV} (<250 \mu A)$, que garante que o circuito integrado está totalmente operacional antes de ativar o controlo das *gates* superior e inferior. As resistências R_{VCC1} e R_{VCC2} são calculadas de modo a que a tensão entre V_{CC} seja apenas superior a V_{CCUV+} quando for atingida a tensão ideal do barramento DC. Quando essa tensão for atingida as saídas de controlo das *gates* LO e HO começam a oscilar. Os condensadores C_{VCC1} e C_{VCC2} têm que conseguir manter a tensão V_{CC} acima do limite inferior, V_{CCUV-} (normalmente 10,5 volts), até que a alimentação auxiliar externa possa assumir o controlo. O circuito de alimentação auxiliar externa é designado “*Charge Pump*” e consiste no condensador C_{SNUB} e nos díodos D_{CP1} e D_{CP2} . Para limitar os picos elevados de corrente é utilizado um díodo zener de 18 volts, sendo este D_{CP1} . As resistências R_{LIM1} e R_{LIM2} (tipicamente de 10 Ohms) e os condensadores C_{VCC1} e C_{VCC2} também têm como objetivo filtrar picos de corrente, minimizando os resultantes picos de tensão em V_{CC} .

Assim, a primeira vez que a tensão V_{CC} ultrapassa V_{CCUV+} , LO oscila várias vezes e cada vez que este se encontra ativo, o condensador C_{BS} é carregado através de V_{CC} . Quando a tensão no condensador, ou seja, a tensão entre VB e VS, se encontra acima de V_{BSUV+} (tipicamente 9 volts), HO também começa a oscilar, alimentando o circuito de alimentação externa. Caso ocorra algum problema e este circuito não assuma o controlo da alimentação do circuito integrado, a tensão V_{CC} irá reduzir até se encontrar menor que V_{CCUV-} , desativando o circuito integrado. Usualmente são utilizadas resistências nas *gates* dos MOSFETs (RHO e RLO), por forma a limitar picos de corrente que possam sair ou entrar nos pinos HO e LO. Como foi referido anteriormente, o modo UVLO também está dependente da tensão em LO. O circuito

integrado apenas sai desse modo se LO estiver com uma tensão inferior a V_{LOSD-} (normalmente 8,5 volts). Usualmente um dos pinos do filamento inferior está ligado ao comum do barramento DC, sendo que o outro é ligado através de uma resistência a LO. Isto significa que se a lâmpada estiver inserida no circuito, irá ligar LO ao comum através dos filamentos, ficando com uma tensão próxima de zero, desativando o modo UVLO e iniciando o funcionamento normal do circuito integrado.

3.6.2 Modo pré-aquecimento e ignição (PH/IGN)

Quando V_{CC} ultrapassa V_{CCUV+} e o pino LO se encontra abaixo de V_{LOSD-} , o circuito integrado sai do modo UVLO e entra no modo de pré-aquecimento e ignição. A tensão que se encontra no pino VCO vai definir a frequência de oscilação da meia-ponte. Deste modo, uma fonte de corrente interna, I_{VCO} (tipicamente de $1\mu A$), irá carregar o condensador que se encontra neste pino, fazendo com que a sua tensão suba linearmente e reduzindo, também linearmente, a frequência de oscilação.

Assim, a frequência desce da frequência máxima do integrado em direção à frequência de ressonância. Nesta fase a lâmpada encontra-se sem descarga, pelo que o circuito de ressonância tem um elevado fator Q . Os filamentos vão sendo aquecidos enquanto a tensão da lâmpada e a corrente na carga aumenta. Quando a tensão for suficientemente elevada, dá-se a ignição da lâmpada e o circuito integrado entra no modo *dimming*. Estas diferentes fases de funcionamento podem ser observadas no diagrama de bode da Figura 3.13.

Caso a lâmpada não arranque, a frequência de oscilação da meia ponte vai diminuindo até que a tensão VCO ultrapasse $V_{VCOFLT+}$ (normalmente 4 volts). Isto leva a que o integrado entre em modo de falha e se desligue. O tempo de duração deste processo, também designado de tempo de pré-aquecimento, pode ser ajustado através do condensador externo CPH.

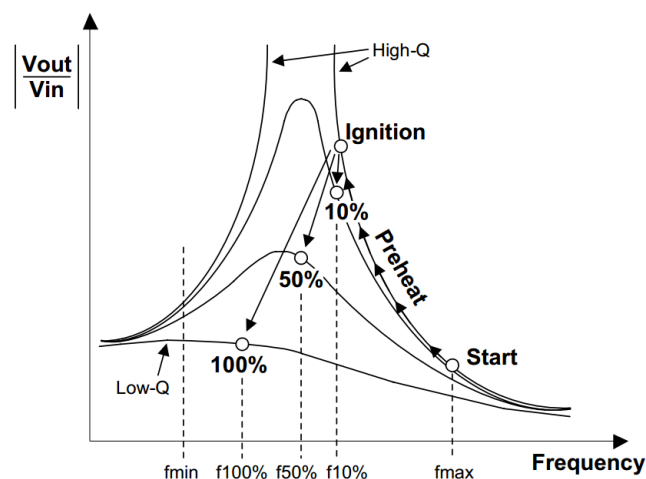


Figura 3.13 - Diagrama de Bode do circuito de ressonância na ignição e nos vários níveis de *dimming* [16].

3.6.3 Modo *dimming* (DIM)

Quando se dá o arranque da lâmpada, o circuito de ressonância torna-se numa bobine (L_{RES}) em série com o paralelo dum condensador (C_{RES}) e uma resistência (R_{LAMP}). Por fim, ainda existe uma resistência para medição de corrente, R_{CS} , de baixo valor, em série com o circuito, por onde passa a corrente AC da lâmpada. A tensão AC que se encontra nos terminais da resistência R_{CS} é ligada ao pino DIM através da resistência de *feedback*, R_{FB} , e do condensador de *feedback*, C_{FB} . No pino DIM também é ligada uma tensão de referência DC que vai definir a intensidade da lâmpada.

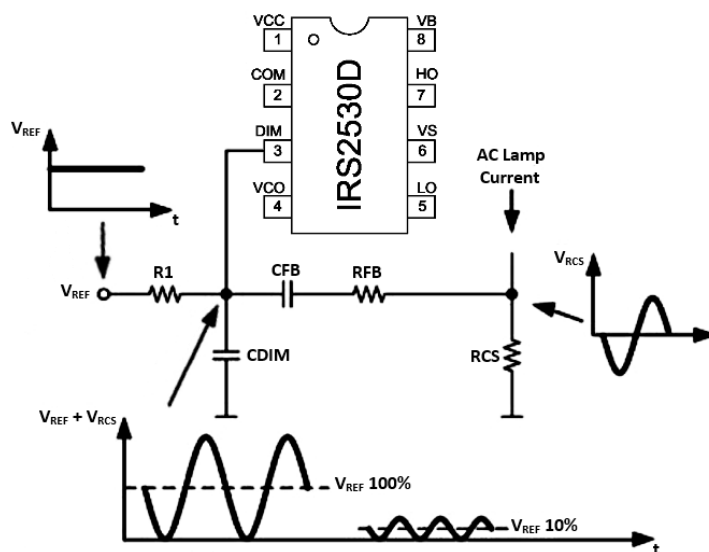


Figura 3.14 - Método de controlo *dimming* AC+DC [17].

Deste modo, depois da ignição da lâmpada o circuito integrado entra no modo *dimming*. Neste modo, o integrado vai tentar sempre garantir que o pico inferior do sinal no pino DIM tenha uma tensão igual ao pino COM, ou seja, a referência do circuito. Quando a referência DC aumenta, o pico inferior do sinal também aumenta. O integrado vai compensar este evento reduzindo a frequência de oscilação da meia ponte, o que leva a um aumento da corrente na lâmpada até que o pico inferior volte a ter o valor do pino COM. Da mesma forma, se o valor de tensão do pico inferior for menor que a referência (massa), a frequência de oscilação vai aumentar para reduzir a corrente da lâmpada, levando a que o pico volte a ter o mesmo valor que a massa. Na Figura 3.14 é possível observar a tensão instantânea nos diferentes pontos do circuito de *dimming*.

O condensador C_{VCO} é que define a velocidade de resposta do ciclo de *dimming*. O condensador C_{DIM} é ligado entre o pino DIM e a massa com o propósito de filtrar ruído de alta frequência proveniente da meia ponte. Durante o modo *dimming* os circuitos de proteção *non-ZVS* e *Crest Factor* também se encontram ativos.

3.6.4 Proteção *non-ZVS* (Zero Voltage Switching)

No modo *dimming*, o ZVS deixa de ocorrer quando a tensão em VS não reduziu totalmente até a tensão no pino COM durante o *deadtime* (tempo em que ambos os MOSFETs estão

desativados). Isto leva a que exista uma tensão entre o dreno e a *source* do MOSFET inferior da meia ponte no momento em que este é ativado, o que pode provocar elevados picos de corrente, danificando ou até destruindo os MOSFETs do circuito. Esta situação acontece usualmente quando o sistema se encontra perto da ressonância ou do lado capacitivo da ressonância. Para proteger o circuito contra esta situação, a cada subida de LO o circuito integrado mede a tensão VS, sendo que se esta se encontrar acima de V_{ZVSTH} (normalmente 4,5 volts), a frequência irá aumentar até que seja obtido a condição ZVS novamente.

3.6.5 Proteção de sobre-corrente (*Crest Factor*)

O circuito integrado mede a tensão VS para saber qual a corrente que flui através do MOSFET inferior da meia ponte. Para isto utiliza a resistência $R_{DS(on)}$ do MOSFET, não sendo necessária a utilização de uma resistência externa para medição da corrente. Como esta resistência varia de transístor para transístor e com a temperatura, o integrado efetua uma medição do *Crest Factor* que deteta quando o pico de corrente ultrapassa a corrente média num fator de 5,5. A utilização do *Crest Factor* é ideal para detetar se a bobine do circuito ressonante saturou, o que pode ser provocado quando o sistema se encontra perto da ressonância. No modo *dimming* esta proteção é utilizada para detetar falha nos filamentos, remoção da lâmpada ou extinção da descarga da mesma. Assim, ao ser detetada sobre-corrente no circuito, o IRS2530D irá entrar em modo de falha.

3.6.6 Modo de falha e reinício da lâmpada

Neste modo o HO é desligado, LO é colocado em circuito aberto e o circuito integrado passa a consumir uma corrente muito reduzida (usualmente 250 μA). O integrado pode ser reiniciado caso seja inserida uma lâmpada (detetado pelo pino LO), ou desligando e voltando a ligar a alimentação VCC.

3.7 Escolha dos componentes

São disponibilizadas pelo fabricante do IRS2530D as fórmulas para calcular os componentes utilizados no esquema, o qual é também disponibilizado [16]. De seguida apresenta-se o cálculo destes componentes.

1. O condensador C_{PH} é utilizado para programação do tempo de pré-aquecimento/ignição. Considerando que o condensador é carregado a $1\mu A$ e que o tempo de pré-aquecimento da lâmpada é de 1 segundo, o cálculo deste condensador encontra-se na Eq. (3.15).

$$C_{PH} = \frac{I_{VCO} \cdot t_{PH/IGN}}{V_{VCOFLT}} = \frac{1\mu A \cdot 1s}{4V} = \frac{1 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{4} = 0,00000025 F = 250 \eta F \quad (3.15)$$

Para este condensador vai ser utilizado o valor de série $C_{PH} = 220 \eta F$.

2. O condensador C_{VCO} serve para ajustar a velocidade de resposta da malha fechada de *dimming*. Para garantir um sistema de resposta suave e estável a variações de potência solicitadas, o fabricante recomenda $C_{VCO} = 2,2 \eta F$.
3. A resistência R_{VCO} também garante uma compensação adicional da malha fechada de *dimming*, pelo que o valor recomendado é $R_{VCO} = 1,5 \text{ k}\Omega$.
4. A resistência R_{CS} é utilizada para medição da corrente na lâmpada no modo *dimming*. Esta resistência tem que ter o valor mais baixo possível de modo a reduzir perdas. No entanto, a tensão de pico para o nível mínimo do *dimming* deve encontrar-se acima do nível mínimo (100 mV) para evitar problemas relacionados com ruído. Considerando que a corrente RMS máxima na lâmpada é de 0,8 A e que é pretendido um *dimming* mínimo de 10%, a corrente RMS mínima da lâmpada é 0,08 A. O cálculo desta resistência encontra-se na Eq. (3.16).

$$R_{CS} = \frac{100mV}{I_{LAMP_RMS_MIN} \cdot \sqrt{2}} \times 5 = \frac{0,1}{0,08 \cdot \sqrt{2}} \times 5 = 4,419 \Omega \quad (3.16)$$

O valor padronizado utilizado foi $R_{CS} = 4,7 \Omega$. A perda resultante desta resistência encontra-se calculada na Eq. (3.17).

$$P_{LOSS_RCS} = I_{LAMP_RMS_MAX}^2 \times R_{CS} = 0,8^2 \times 4,7 = 3,008 \text{ W} \quad (3.17)$$

Este valor poderá ser alterado de acordo com os testes que forem efetuados.

5. Existem outros componentes adicionais para o ciclo de *dimming*. Estes são utilizados para limitar a corrente e filtrar ruído, e têm os seguintes valores:
 - $R_{FB} = 1 \text{ k}\Omega$;
 - $C_{FB} = 0,1 \mu F$;
 - $C_{DIM} = 10 \eta F$.
6. Os condensadores C_{VCC2} e C_{BS} são os condensadores de alimentação da parte inferior e superior da meia ponte respetivamente e têm como função manter a tensão de alimentação e filtrar ruídos de alta frequência. O valor destes condensadores, recomendado pelo fabricante, é $C_{VCC2} = C_{BS} = 0,1 \mu F$.
7. As resistências R_{VCC1} e R_{VCC2} são utilizadas para fornecer uma corrente reduzida, tipicamente $250 \mu A$, à alimentação do integrado, V_{CC} . Elas definem qual a tensão a que o IRS2530D irá iniciar. Estas resistências podem ser substituídas por apenas uma resistência, a que vamos dar o nome de R_{VCC} . A tensão de arranque do integrado, V_{CCUV+} , é 12,5 volts. Considerando que a tensão AC RMS em Portugal é de 230 volts, iremos definir que o início do sistema será a partir de 200 volts. O cálculo de R_{VCC} encontra-se na Eq. (3.18).

$$R_{VCC} = R_{VCC1} + R_{VCC2} = \frac{V_{ACON} \cdot \sqrt{2} - V_{CCUV+}}{250 \mu A} = \frac{200 \cdot \sqrt{2} - 12,5}{250 \cdot 10^{-6}}$$
$$R_{VCC} = 1081370,85 \Omega \quad (3.18)$$

O valor padronizado a utilizar será $R_{VCC} = 1 M\Omega$. O valor desta resistência poderá ser alterado mais tarde, depois de serem efetuados testes ao circuito.

8. Os componentes de alimentação adicionais são os seguintes:

- $C_{VCC1} = 1 \mu F$;
- $C_{SNUB} = 1 \eta F / 1 kV$;
- $D_{CP1} = 18 V / 500 mW$;
- $D_{CP2} = 1N4148$;
- $R_{LIM1} = R_{LIM2} = 10 \Omega$.

9. As resistências R_{LMP1} e R_{LMP2} são utilizadas como *pull-up* no pino LO e para detetar a remoção e inserção da lâmpada no circuito.

- $R_{LMP1} = 470 k\Omega$;
- $R_{LMP2} = 1 M\Omega$.

1. B500R: este componente é uma ponte de díodos para retificação de onda completa da alimentação sinusoidal. Como a lâmpada consome uma corrente de 0,8 A e tendo em atenção picos de corrente, a ponte escolhida tolera correntes até 2 A. Visto que o pico da senoide é de $230 \times \sqrt{2} = 325 \text{ V}$, a tensão máxima desta ponte é de 1000V.
2. C_F: este condensador tem como objetivo filtrar picos transitórios causados pela comutação dos MOSFETs. O valor deste condensador é de 220 nF, de forma a filtrar picos na gama de frequências do balastro (40 kHz).
3. C_{BUS}: este condensador tem como objetivo reduzir a tensão de *ripple* depois da ponte de díodos. Considerando a corrente RMS da lâmpada de 0,8 A, para um critério que limite a tensão de *ripple* a 10% da tensão máxima [20], o cálculo do condensador encontra-se na Eq. (3.19):

$$C_{BUS} = \frac{I_{LOAD}}{2 \times f \times V_{RIPPLE}} = \frac{0,8}{2 \times 50 \times 32,5} = 0,000246 \text{ F} = 246 \mu\text{F} \quad (3.19)$$

Utilizou-se o valor padronizado de 220 μF. A tensão máxima selecionada para este condensador foi de 400 V, tendo em conta que a tensão máxima é de 325 V.

4. M1 e M2: estes componentes são os MOSFETs IRF840. O IRS2530D está preparado para operar com MOSFETs, pelo que os pinos HO e LO possuem uma saída de tensão igual a VCC (12,5 V) para ativá-los. De modo a estarem preparados para elevadas correntes estes suportam 8 A a 25° C e 5,1 A a 100° C. Outra razão para a escolha do IRF840 é a sua tensão máxima V_{DS} de 500 V, que é suficiente para suportar a tensão máxima do barramento DC (325 V).
5. R_{HO} e R_{LO}: estas resistências são recomendadas para colocar entre o controlo dos MOSFETs e a sua *gate* para descarregar a capacitância dos mesmos. Neste caso iremos usar resistências de 10 Ω.
6. C_{DC}: este condensador tem como função filtrar a componente DC da onda quadrada de alta frequência de entrada, no circuito de ressonância. Este também afeta o funcionamento do circuito de ressonância, pelo que terá que ser calculado em conjunto com este circuito. Será calculado no próximo subcapítulo (Subcapítulo 3.9).
7. L_{RES} e C_{RES}: esta bobine e condensador constituem o circuito ressonante. O seu cálculo detalhado será efetuado no subcapítulo seguinte (Subcapítulo 3.9).

3.9 Cálculo dos componentes do circuito de ressonância

O circuito de ressonância é composto por L_{RES} e C_{RES}. Como a alimentação de entrada é uma onda quadrada com componente DC, é necessário o condensador C_{DC} à entrada para filtrar esta componente [10] [15]. No entanto, este condensador também afeta o funcionamento do circuito ressonante onde se encontra incluído, pelo que terá de ser calculado em conjunto com os restantes componentes. O cálculo destes componentes é mais complexo, pois é necessário

efetuar uma análise do circuito, em relação à frequência. A maioria dos fabricantes apenas disponibiliza as características da lâmpada a baixa frequência (50/60 Hz), o que torna o processo ainda mais difícil.

A utilização da tensão de linha (50/60 Hz) como fonte de alimentação para lâmpadas de vapor de mercúrio é inadequada [10]. A estas frequências os elétrons e os átomos ionizados têm tempo de se recombinar a cada inversão de corrente. Isto leva a que a ignição da lâmpada aconteça duas vezes em cada período da forma de onda. Quando as lâmpadas são operadas a altas frequências (acima de 5 kHz), os elétrons e os iões não têm tempo para se recombinar, não sendo necessário um consumo extra de potência para ligar a lâmpada novamente. O resultado é um aumento do fluxo luminoso e da eficiência da lâmpada.

As características disponibilizadas pelo fornecedor da lâmpada escolhida para esta aplicação são as seguintes (a baixa frequência – BF):

- Tensão nominal (RMS) – $V_{NOM(BF)} = 97 V$;
- Corrente nominal (RMS) – $I_{NOM(BF)} = 0,8 A$;
- Potência Nominal – $P_{NOM(BF)} = 75 W$.

A potência da lâmpada a qualquer frequência pode ser descrita pela Eq. (3.20), sendo FP_{LAMP} o seu fator de potência.

$$P_{LAMP} = V_{LAMP} \times I_{LAMP} \times FP_{LAMP} \quad (3.20)$$

Uma outra vantagem da utilização de alta frequência em lâmpadas de vapor de mercúrio é que estas têm um comportamento maioritariamente resistivo, sendo o fator de potência a altas frequências $FP_{(HF)} \approx 1$ [14]. Como a relação entre a potência e a corrente se mantém nestas lâmpadas, a alta frequência, podemos considerar o seguinte:

- Potência nominal – $P_{NOM(AF)} = V_{NOM(AF)} \times I_{NOM(AF)} = P_{NOM(BF)} = 75 W$;
- Corrente nominal - $I_{NOM(AF)} = I_{NOM(BF)} = 0,8 A$;
- Tensão nominal - $V_{NOM(AF)} = P_{NOM(AF)} / I_{NOM(AF)} = 75 / 0,8 = 93,75 V$;
- Resistência nominal - $R_{NOM(AF)} = P_{NOM(AF)} / I_{NOM(AF)}^2 = 75 / 0,8^2 = 117,1875 \Omega$.

As lâmpadas de vapor de mercúrio de baixa pressão podem ser consideradas puramente resistivas a altas frequências. No entanto, a sua resistência varia com a potência. Quando a potência é reduzida, o vapor de mercúrio encontra-se menos ionizado (frio), levando a um aumento da sua resistência. Se a potência for elevada, o gás da lâmpada encontra-se altamente ionizado (quente), tornando a resistência da lâmpada menor. Este fenómeno cria um ciclo de realimentação positiva, pois quanto maior a corrente na lâmpada, menor é a sua resistência e quanto menor a sua resistência, maior é a sua corrente. Esta é a razão pela qual é necessário um balastro para limitar a corrente da lâmpada.

Alguns autores utilizam uma resistência fixa na simulação de circuitos de balastro, desprezando a característica referida anteriormente [14]. Contudo, é de notar que esta particularidade pode afetar drasticamente a escolha dos componentes do balastro. Outros têm adotado variados modelos dinâmicos para definir a resistência da lâmpada, em função da potência ou da corrente da mesma [10] [14] [21]. A utilização de um destes modelos é mais fiável para a simulação de

um balastro. No entanto, estes estão dependentes de constantes que variam de lâmpada para lâmpada, e que apenas podem ser obtidos com dados experimentais.

Para efetuar os cálculos que permitem a seleção dos componentes do balastro apenas será considerada a componente fundamental da onda quadrada de entrada. Pode ser demonstrado que, funcionando próximo da frequência natural, a distorção harmónica da tensão de saída é baixa [15].

3.9.1 Cálculo da componente fundamental de entrada

Na Eq. (3.21) encontra-se a definição da série trigonométrica de Fourier em a_n e b_n .

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{L} \cdot x\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L} \cdot x\right) \right] \quad (3.21)$$

Nesta série, a Eq. (3.22) define a_0 , a Eq. (3.23) define a_n e a Eq. (3.24) define b_n .

$$a_0 = \frac{1}{2L} \cdot \int_{-L}^L f(x) \cdot dx \quad , \text{onde } 2L = T(\text{período}) \quad (3.22)$$

$$a_n = \frac{1}{L} \cdot \int_{-L}^L f(x) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{L} \cdot x\right) \cdot dx \quad , \text{onde } n = 1,2,3,4,5\dots \quad (3.23)$$

$$b_n = \frac{1}{L} \cdot \int_{-L}^L f(x) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L} \cdot x\right) \cdot dx \quad , \text{onde } n = 1,2,3,4,5\dots \quad (3.24)$$

A tensão de alimentação do circuito de potência do balastro é uma onda quadrada de 0 volts a 325 volts com frequência variável f_0 , como se pode observar no gráfico da Figura 3.16.

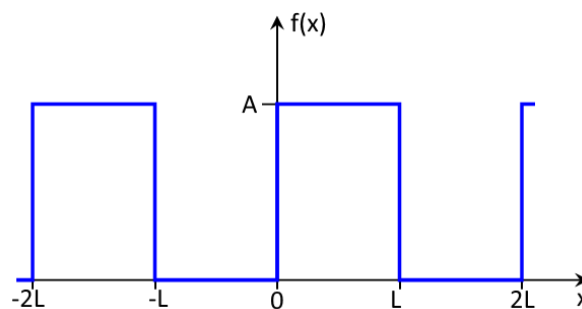


Figura 3.16 - Gráfico da tensão de alimentação do circuito de ressonância do balastro.

Assim, A é a amplitude da onda (325 V) e x é a frequência angular, ou seja, $x \equiv \omega = 2\pi f_0 t$, o que significa que, sendo o período igual a 2π , $L = \pi$. O cálculo das constantes de Fourier encontra-se em seguida.

Cálculo de a_0 , Eq. (3.25):

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot dx = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\int_{-\pi}^0 0 \cdot dx + \int_0^{\pi} A \cdot dx \right] = \frac{1}{2\pi} \cdot \pi_0[A \cdot x] \\
 a_0 &= \frac{1}{2\pi} \cdot [A \cdot \pi - 0 \cdot \pi] = \frac{A\pi}{2\pi} = \frac{A}{2}
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Cálculo de a_1 , Eq. (3.26):

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \cos\left(\frac{1 \cdot \pi}{\pi} \cdot x\right) \cdot dx \\
 a_1 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{-\pi}^0 0 \cdot \cos(x) \cdot dx + \int_0^{\pi} A \cdot \cos(x) \cdot dx \right] \\
 a_1 &= \frac{1}{\pi} \cdot \pi_0[A \cdot \sin(x)] = \frac{1}{\pi} \cdot [A \cdot \sin(\pi) - A \cdot \sin(0)] = 0
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

Cálculo de a_2 , Eq. (3.27):

$$\begin{aligned}
 a_2 &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{\pi} \cdot x\right) \cdot dx \\
 a_2 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{-\pi}^0 0 \cdot \cos(2 \cdot x) \cdot dx + \int_0^{\pi} A \cdot \cos(2 \cdot x) \cdot dx \right] \\
 a_2 &= \frac{1}{\pi} \cdot \pi_0\left[\frac{A}{2} \cdot \sin(2x)\right] = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{A}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi) - \frac{A}{2} \cdot \sin(0)\right] = 0
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

Cálculo de a_3 , Eq. (3.28):

$$\begin{aligned}
 a_3 &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \cos\left(\frac{3 \cdot \pi}{\pi} \cdot x\right) \cdot dx \\
 a_3 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{-\pi}^0 0 \cdot \cos(3 \cdot x) \cdot dx + \int_0^{\pi} A \cdot \cos(3 \cdot x) \cdot dx \right] \\
 a_3 &= \frac{1}{\pi} \cdot \pi_0\left[\frac{A}{3} \cdot \sin(3x)\right] = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{A}{3} \cdot \sin(3 \cdot \pi) - \frac{A}{3} \cdot \sin(0)\right] = 0
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

A Eq. (3.26), Eq. (3.27) e Eq. (3.28) são concretizações da fórmula geral $a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{A}{n} \cdot \sin(n \cdot \pi) - \frac{A}{n} \cdot \sin(0)\right] = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{A}{n} \cdot 0 - \frac{A}{n} \cdot 0\right] = 0$, onde $n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$

Cálculo de b_1 , Eq. (3.29):

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \sin\left(\frac{1 \cdot \pi}{\pi} \cdot x\right) \cdot dx \\
 b_1 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{-\pi}^0 0 \cdot \sin(x) \cdot dx + \int_0^{\pi} A \cdot \sin(x) \cdot dx \right] \\
 b_1 &= \frac{1}{\pi} \cdot \pi [-A \cdot \cos(x)] = \frac{1}{\pi} \cdot [-A \cdot \cos(\pi) - (-A \cdot \cos(0))] = \frac{1}{\pi} \cdot [A + A] \\
 b_1 &= \frac{2 \cdot A}{\pi}
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

Cálculo de b_2 , Eq. (3.30):

$$\begin{aligned}
 b_2 &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\pi} \cdot x\right) \cdot dx \\
 b_2 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{-\pi}^0 0 \cdot \sin(2 \cdot x) \cdot dx + \int_0^{\pi} A \cdot \sin(2 \cdot x) \cdot dx \right] \\
 b_2 &= \frac{1}{\pi} \cdot \pi \left[-\frac{A}{2} \cdot \cos(2 \cdot x) \right] = \frac{1}{\pi} \cdot \left[-\frac{A}{2} \cdot \cos(2 \cdot \pi) - \left(-\frac{A}{2} \cdot \cos(0)\right) \right] \\
 b_2 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[-\frac{A}{2} + \frac{A}{2} \right] = 0
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

Cálculo de b_3 , Eq. (3.31):

$$\begin{aligned}
 b_3 &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \sin\left(\frac{3 \cdot \pi}{\pi} \cdot x\right) \cdot dx \\
 b_3 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{-\pi}^0 0 \cdot \sin(3 \cdot x) \cdot dx + \int_0^{\pi} A \cdot \sin(3 \cdot x) \cdot dx \right] \\
 b_3 &= \frac{1}{\pi} \cdot \pi \left[-\frac{A}{3} \cdot \cos(3 \cdot x) \right] = \frac{1}{\pi} \cdot \left[-\frac{A}{3} \cdot \cos(3 \cdot \pi) - \left(-\frac{A}{3} \cdot \cos(0)\right) \right] \\
 b_3 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{A}{3} + \frac{A}{3} \right] = \frac{2 \cdot A}{3 \cdot \pi}
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

Cálculo de b_4 , Eq. (3.32):

$$\begin{aligned}
 b_4 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \sin\left(\frac{4 \cdot \pi}{\pi} \cdot x\right) \cdot dx \\
 b_4 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{-\pi}^0 0 \cdot \sin(4 \cdot x) \cdot dx + \int_0^{\pi} A \cdot \sin(4 \cdot x) \cdot dx \right] \\
 b_4 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[-\frac{A}{4} \cdot \cos(4 \cdot x) \right]_0^{\pi} = \frac{1}{\pi} \cdot \left[-\frac{A}{4} \cdot \cos(4 \cdot \pi) - \left(-\frac{A}{4} \cdot \cos(0)\right) \right] \\
 b_4 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[-\frac{A}{4} + \frac{A}{4} \right] = 0
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

Cálculo de b_5 , Eq. (3.33):

$$\begin{aligned}
 b_5 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \sin\left(\frac{5 \cdot \pi}{\pi} \cdot x\right) \cdot dx \\
 b_5 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{-\pi}^0 0 \cdot \sin(5 \cdot x) \cdot dx + \int_0^{\pi} A \cdot \sin(5 \cdot x) \cdot dx \right] \\
 b_5 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[-\frac{A}{5} \cdot \cos(5 \cdot x) \right]_0^{\pi} = \frac{1}{\pi} \cdot \left[-\frac{A}{5} \cdot \cos(5 \cdot \pi) - \left(-\frac{A}{5} \cdot \cos(0)\right) \right] \\
 b_5 &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{A}{5} + \frac{A}{5} \right] = \frac{2 \cdot A}{5 \cdot \pi}
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

A Eq. (3.29), Eq. (3.30), Eq. (3.31), Eq. (3.32) e Eq. (3.33) são concretizações da solução geral

$$\begin{aligned}
 b_n &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[-\frac{A}{n} \cdot \cos(n \cdot \pi) - \left(-\frac{A}{n} \cdot \cos(0)\right) \right] = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{A}{n} + \frac{A}{n} \right] = \frac{2 \cdot A}{n \cdot \pi} \quad , \quad \text{onde } n = 1, 3, 5, 7, \dots \text{ e} \\
 b_n &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[-\frac{A}{n} \cdot \cos(n \cdot \pi) - \left(-\frac{A}{n} \cdot \cos(0)\right) \right] = \frac{1}{\pi} \cdot \left[-\frac{A}{n} + \frac{A}{n} \right] = 0, \text{ onde } n = 2, 4, 6, 8, \dots
 \end{aligned}$$

Deste modo, podemos concluir que a série de Fourier que representa a onda quadrada da tensão de alimentação do circuito de ressonância é a que se apresenta na Eq. (3.34).

$$V(t) = \frac{A}{2} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot A}{n \cdot \pi} \cdot \sin(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) \tag{3.34}$$

Da Eq. (3.34) podemos retirar a componente fundamental, que se encontra na equação (3.35).

$$V_1(t) = \frac{2 \cdot A}{\pi} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) \tag{3.35}$$

Com base na Eq. (3.35) podemos obter a amplitude A_1 da componente fundamental através da Eq. (3.36) e a o valor da tensão eficaz da componente fundamental $V_1 \text{ ef}$ através da Eq. (3.37).

$$A_1 = \frac{2 \cdot A}{\pi} = \frac{2 \cdot 325}{\pi} = 206,9 \text{ V} \quad (3.36)$$

$$V_{1ef} = \frac{A_1}{\sqrt{2}} = \frac{206,9}{\sqrt{2}} = 146,3 \text{ V} \quad (3.37)$$

3.9.2 Cálculo dos componentes e parâmetros de funcionamento

Os cálculos nesta secção foram realizados com base na referência [10].

Conceitos base:

- Impedância base do circuito de ressonância: $Z_B = \sqrt{L/C}$
- Carga normalizada: $Q = R/Z_B$
- Frequência normalizada: $\Omega = \omega/\omega_0 = \omega \cdot \sqrt{L \cdot C} \cdot \omega_0 = 1/\sqrt{L \cdot C}$
- Frequência natural do circuito de ressonância: ω_0

Para esta situação, o circuito da Figura 3.17 é aquele que é tomado em consideração.

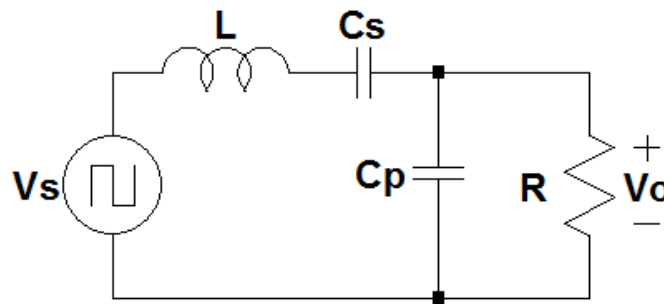


Figura 3.17 - Circuito de ressonância do balastro eletrônico, adaptado de [10].

No circuito da Figura 3.17, os diferentes elementos têm a seguinte correspondência:

- $V_S = V(t)$
- $L = L_{RES}$
- $C_S = C_{DC}$
- $C_P = C_{RES}$
- $R = R_{LAMP}$

Para a realização dos cálculos iremos apenas considerar a componente fundamental da onda quadrada. Assim, a tensão de saída fundamental, V_O , pode ser calculada através da Eq. (3.38).

$$V_{O,1} = V_{S,1} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Q_{SP}^2} \left(\Omega - \frac{1-\alpha}{\Omega} \right)^2 + \frac{1}{\alpha^2} (\Omega^2 - 1)^2}} \quad (3.38)$$

Os diferentes parâmetros da Eq. (3.38) são os seguintes:

- Q_{SP} , carga normalizada, Eq. (3.39);

$$Q_{SP} = \frac{R}{Z_B} = R \cdot \left(\frac{L}{C_E} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.39)$$

- Ω , frequência normalizada, Eq. (3.40);

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} = \omega \sqrt{L \cdot C_E} \quad (3.40)$$

- α , relação entre C_P e C_S , Eq. (3.41);

$$\alpha = \frac{C_E}{C_P} = 1 - \left(\frac{C_E}{C_S} \right) \quad (3.41)$$

- C_E , condensador equivalente, Eq. (3.42).

$$C_E = \frac{C_S \cdot C_P}{C_S + C_P} \quad (3.42)$$

A variável α , que relaciona os condensadores C_P e C_S , tem usualmente um valor entre 0,8 e 0,9. Quanto menor este valor, menor é a variação de frequência entre os pontos de funcionamento de aquecimento e de ignição.

As equações que se seguem têm em conta os seguintes parâmetros de projeto:

- $V_S = V_{O,1} = 206,9 \text{ V}$
- $I_{LA} = 0,8 \text{ A (RMS)}$
- $\alpha = 0,9$
- $f_S = 40 \text{ kHz}$ (frequência nominal considerando $\Omega = 1 \rightarrow \omega = \omega_0$)

Impedância base do circuito de ressonância, Eq. (3.43):

$$Z_B = \frac{V_S}{\alpha \cdot I_{LA}} = \frac{206,9}{0,9 \times (0,8 \times \sqrt{2})} = 203,19 \Omega \quad (3.43)$$

Indutância de ressonância, Eq. (3.44):

$$L = \frac{Z_B}{2 \cdot \pi \cdot f_S} = \frac{203,19}{2 \cdot \pi \cdot 40 \cdot 10^3} = 0,000808 \text{ H} = 0,808 \text{ mH} \quad (3.44)$$

Condensador de ressonância, Eq. (3.45):

$$C_P = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot \alpha \cdot Z_B} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 203,19} = 2,1758 \cdot 10^{-8} \text{ F}$$

$$C_P = 21,758 \text{ nF} \quad (3.45)$$

Condensador de desacoplamento, Eq. (3.46):

$$C_S = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot (1 - \alpha) \cdot Z_B} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,9) \cdot 203,19} =$$

$$C_S = 1,9582 \cdot 10^{-7} F = 195,82 \eta F \quad (3.46)$$

Condensador equivalente, Eq. (3.47):

$$C_E = \frac{C_S \times C_P}{C_S + C_P} = \frac{195,82 \times 21,758}{195,82 + 21,758} = 19,582 \eta F \quad (3.47)$$

Potência da lâmpada, Eq. (3.48):

$$P_{LA} = V_{LA} \times I_{LA} \times FP_{LA} \quad (3.48)$$

Na Eq. (3.48), FP_{LA} é o fator de potência da lâmpada. Se a frequência de alimentação for elevada, (normalmente considerado acima de 5 kHz), a lâmpada torna-se puramente resistiva, podendo considerar-se $FP_{LA} = 1$. Tendo em conta que a potência nominal da lâmpada é $P_{LA} = 75 W$ e que a corrente nominal da lâmpada é $I_{LA} = 0,8 A$ (RMS), foi obtida a tensão nominal com a Eq. (3.49) e a resistência nominal da lâmpada com a Eq. (3.50).

$$V_{LA} = \frac{P_{LA}}{I_{LA}} = \frac{75}{0,8} = 93,75 V \quad (3.49)$$

$$R_{LA} = \frac{V_{LA}}{I_{LA}} = \frac{93,75}{0,8} = 117,19 \Omega \quad (3.50)$$

Carga normalizada, Eq. (3.51):

$$Q_{SP} = \frac{R}{Z_B} = \frac{117,19}{203,19} = 0,577 \quad (3.51)$$

Amplitude da componente fundamental da tensão de saída, Eq. (3.52):

$$V_{O,1} = V_{S,1} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Q_{SP}^2} \times \left(\Omega - \frac{1 - \alpha}{\Omega}\right)^2 + \frac{1}{\alpha^2} \times (\Omega^2 - 1)^2}}$$

$$V_{O,1} = 206,9 \times \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{0,577^2} \times \left(1 - \frac{1 - 0,9}{1}\right)^2 + \frac{1}{0,9^2} \times (1^2 - 1)^2}} = 132,646 V \quad (3.52)$$

Amplitude da componente fundamental da corrente de saída, Eq. (3.53):

$$I_{S,1} = \frac{V_{S,1}}{Z_B} \times \left[\frac{1 + \left(\Omega^2 \times \frac{Q_{SP}^2}{\alpha^2} \right)}{\left(\Omega - \left(1 - \frac{\alpha}{\Omega} \right) \right)^2 + \left(\frac{Q_{SP}^2}{\alpha^2} \right) \times (\Omega^2 - 1)^2} \right]^{1/2}$$

$$I_{S,1} = \frac{206,9}{203,19} \times \left[\frac{1 + \left(1^2 \times \frac{0,577^2}{0,9^2} \right)}{\left(1 - \left(1 - \frac{0,9}{1} \right) \right)^2 + \left(\frac{0,577^2}{0,9^2} \right) \times (1^2 - 1)^2} \right]^{1/2} = 1,344 \text{ A} \quad (3.53)$$

Fase de pré-aquecimento e fase de ignição

Os cálculos que se seguem estão relacionados com as fases de pré-aquecimento e de ignição da lâmpada. Assim, considerou-se $Q_{SP} = \infty$, pois a resistência da lâmpada é considerada infinita quando não existe descarga. O fabricante da lâmpada não fornece o valor da tensão de ignição (V_{IG}), nem o valor da corrente de aquecimento dos filamentos (I_H). Deste modo, ao analisar algumas lâmpadas semelhantes, considerou-se a amplitude da tensão de ignição $V_{IG} = 1000 \text{ V}$.

O valor da corrente de aquecimento foi obtido experimentalmente. Foi aplicada uma tensão aos filamentos, de forma a que o valor da sua resistência passasse a um terço da resistência à temperatura ambiente. Sendo a resistência de cada filamento igual a 12Ω , a tensão aplicada foi elevada até que a resistência tivesse o valor de 4Ω ($1/3$ do valor em frio) [15]. A tensão necessária para obter esse valor de resistência foi de aproximadamente 4 V , sendo que a corrente nessa situação é $I_H = 4\text{V}/4 \Omega = 1 \text{ A}$ (DC ou RMS).

Frequência normalizada de aquecimento da lâmpada, Eq. (3.54):

$$\Omega_H = \frac{V_S}{2 \cdot Z_B \cdot I_H} + \sqrt{1 + \left(\frac{V_S}{2 \cdot Z_B \cdot I_H} \right)^2}$$

$$\Omega_H = \frac{206,9}{2 \times 203,19 \times 1 \times \sqrt{2}} + \sqrt{1 + \left(\frac{206,9}{2 \times 203,19 \times 1 \times \sqrt{2}} \right)^2}$$

$$\Omega_H = 1,423 \quad (3.54)$$

Amplitude da tensão de pré-aquecimento da lâmpada, Eq. (3.55):

$$V_H = \frac{\alpha \cdot V_S}{\Omega_H^2 - 1} = \frac{0,9 \times 206,9}{1,423^2 - 1} = 181,681 \text{ V} \quad (3.55)$$

Frequência de pré-aquecimento da lâmpada, Eq. (3.56):

$$\omega_H = \frac{\Omega_H}{\sqrt{L \cdot C_E}} = \frac{1,423}{\sqrt{0,808 \times 10^{-3} \times 19,582 \times 10^{-9}}} = 357742,631 \text{ rad/s}$$

$$f_H = \frac{\omega_H}{2 \cdot \pi} = \frac{357742,631}{2 \cdot \pi} = 56936,508 \text{ Hz} = 56,94 \text{ kHz} \quad (3.56)$$

Frequência normalizada de ignição da lâmpada, Eq. (3.57):

$$\Omega_{IG} = \sqrt{1 + \alpha \times \frac{V_S}{V_{IG}}} = \sqrt{1 + 0,9 \times \frac{206,9}{1000}} = 1,089 \quad (3.57)$$

Frequência de ignição da lâmpada, Eq. (3.58):

$$\omega_{IG} = \frac{\Omega_{IG}}{\sqrt{L \cdot C_E}} = \frac{1,089}{\sqrt{0,808 \times 10^{-3} \times 19,582 \times 10^{-9}}} = 273774,93 \text{ rad/s}$$

$$f_{IG} = \frac{\omega_{IG}}{2 \cdot \pi} = \frac{273774,93}{2 \cdot \pi} = 43572,633 \text{ Hz} = 43,57 \text{ kHz} \quad (3.58)$$

Deste modo, com base nos resultados das equações anteriores, as frequências de funcionamento são as seguintes:

- Frequência nominal - $f_S = 40 \text{ kHz}$
- Frequência de aquecimento - $f_H = 56,94 \text{ kHz}$
- Frequência de ignição - $f_{IG} = 43,57 \text{ kHz}$

Os componentes calculados para utilizar no circuito de ressonância seriam os seguintes:

- $L_{RES} = L = 0,808 \text{ mH}$
- $C_{RES} = C_P = 21,758 \text{ nF}$
- $C_{DC} = C_S = 195,82 \text{ nF}$

Estes valores resultam num balastro com frequência nominal à frequência natural do circuito com elevado fator de carga e com frequências correspondentes às fases de pré-aquecimento e ignição numa gama relativamente pequena. Pequenas variações de frequência resultam em variações significativas da potência da lâmpada.

Uma gama maior de variação de frequência permite um controlo mais suave num balastro com variação de potência ou capacidade de *dimming*.

Por outro lado, calculando a corrente nos filamentos à potência nominal e a corrente de ignição, respetivamente:

$$I_{FI} = V_{LA} \cdot 2\pi \cdot f_S \cdot C_{RES} = 93,75 \times 2\pi \times 40 \times 10^3 \times 21,758 \times 10^{-9} = 0,513 \text{ A(RMS)}$$

$$I_{IG} = V_{IG} \cdot 2\pi \cdot f_{IG} \cdot C_{RES} = \frac{1000}{\sqrt{2}} \times 2\pi \times 43,57 \times 10^3 \times 21,758 \times 10^{-9} = 4,212 \text{ A(RMS)}$$

Verifica-se que são valores elevados que podem deteriorar a lâmpada e resultam numa bobine com maiores exigências. Assim, para a construção do protótipo do balastro optou-se por limitar estas correntes usando um $C_{RES} = 10 \eta F$. Manteve-se a relação $\alpha = 0,9$ resultando num $C_{DC} = 100 \eta F$ e permitindo usar o mesmo valor da bobine para a corrente nominal.

A nova corrente nos filamentos à potência nominal e a nova corrente de ignição são, respetivamente:

$$I_{FI} = V_{LA} \cdot 2\pi \cdot f_S \cdot C_{RES} = 93,75 \times 2\pi \times 40 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-9} = 0,236 A(RMS)$$

$$I_{IG} = V_{IG} \cdot 2\pi \cdot f_{IG} \cdot C_{RES} = \frac{1000}{\sqrt{2}} \times 2\pi \times 43,57 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-9} = 1,936 A(RMS)$$

Antes da construção e teste do protótipo, o balastro é simulado para verificar a adequação do seu funcionamento.

3.10 Simulação do circuito com resistência da lâmpada constante

Uma vez que não existem parâmetros suficientes para caracterizar completamente a lâmpada, não é possível saber o seu comportamento sem a testar experimentalmente. Muitos autores criam simulações com um valor de resistência constante para saber se a lâmpada, à potência nominal, se encontra num intervalo de frequências aceitável [14]. Também é possível simular o pré-aquecimento dos filamentos e ignição da lâmpada, pois nesses momentos a lâmpada encontra-se com uma resistência quase infinita.

Para a construção do balastro real vai ser utilizado um $C_{DC} = 100\eta F/400 V$ e um $C_{RES} = 10 \eta F/1000 V$. A bobine é construída manualmente com um núcleo para altas frequências e fio de cobre unifilar de 0,8 mm. Deste modo, o valor da bobine pode ser alterado através do número de voltas ou da abertura (entreferro) do núcleo.

Assim, foram efetuadas simulações do circuito em duas ferramentas de software, o LTSpice e o MatLab. Como referido no final do Subcapítulo 3.9 admitiu-se o seguinte:

- $C_{DC} = 100 \eta F$
- $C_{RES} = 10 \eta F$
- $R_{LAMP} = 117,19 \Omega$

As simulações foram efetuadas com diferentes valores de L_{RES} semelhantes ao valor calculado anteriormente.

Nas simulações seguintes é considerado que a resistência da lâmpada se encontra entre o centro do filamento superior e o centro do filamento inferior da lâmpada. Assim, visto que a resistência obtida experimentalmente de cada filamento é de 4Ω , os terminais da resistência da lâmpada encontram-se ligados entre duas resistências de 2Ω , que correspondem a metade de um filamento [13].

Os valores dos componentes utilizados para estas simulações devem-se à disponibilidade dos mesmos, de forma a obtermos uma simulação correspondente ao balastro real a desenvolver.

3.10.1 Simulação LTSpice

A primeira plataforma utilizada para simular este circuito foi o *software* LTSpice. Neste *software* foi desenhado o circuito da Figura 3.18.

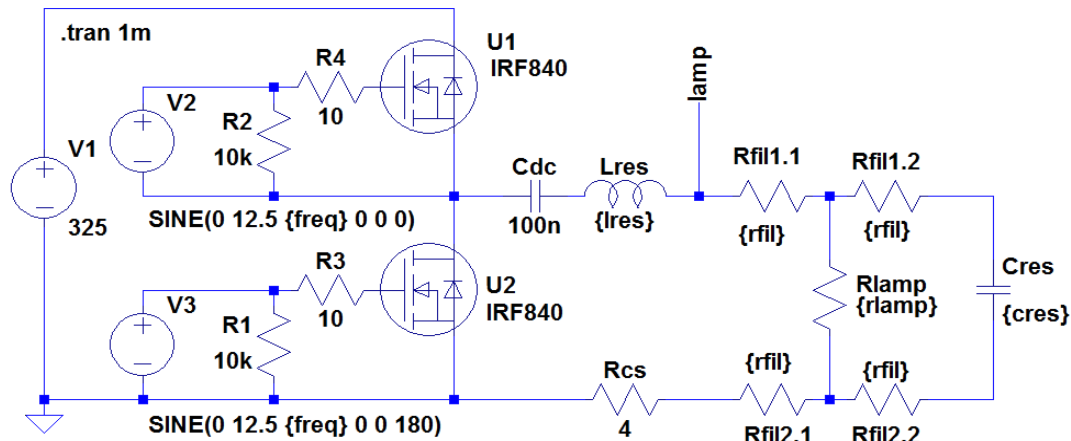


Figura 3.18 - Circuito aplicado na simulação LTSpice com resistência constante da lâmpada.

O circuito apresentado na Figura 3.18 contém o circuito do balastro em que a fonte de alimentação foi substituída por uma fonte de tensão DC (V1) com uma tensão de 325 V. O controle dos MOSFETs é feito por duas fontes sinusoidais com a mesma frequência e defasamento de 180°. Os restantes componentes têm os seguintes valores:

- $C_{DC} = 100 \text{ nF}$;
- $C_{RES} = 10 \text{ nF}$;
- $R_{fil1.1} = R_{fil1.2} = R_{fil2.1} = R_{fil2.2} = 2 \text{ } \Omega$;
- $R_{LAMP} = 117,19 \text{ } \Omega$ (funcionamento);
- $R_{LAMP} = 100000 \text{ M}\Omega$ (ignição);
- $R_{CS} = 4 \text{ } \Omega$.

Quando a lâmpada se encontra “desligada” a sua resistência é considerada infinita. Assim, para a simulação da ignição, foi atribuído o valor de 100000 M Ω à resistência da lâmpada. Em seguida apresentam-se os gráficos das simulações com diferentes valores de L_{RES} .

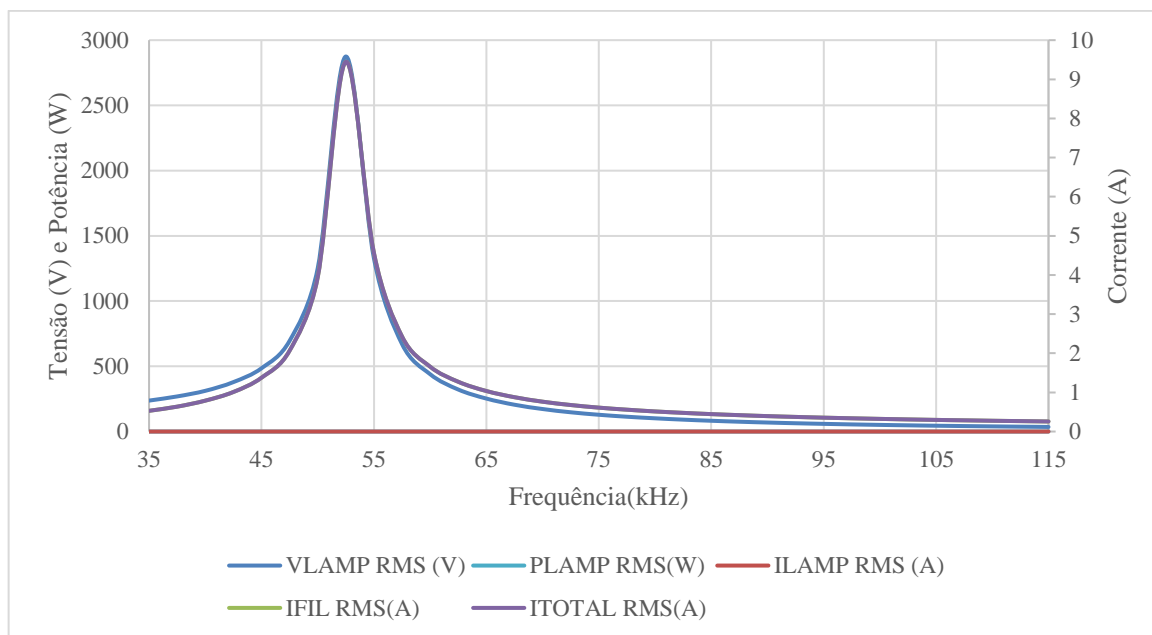


Figura 3.19 - Gráfico da simulação LTSPice da lâmpada em ignição, com $L_{res} = 1 \text{ mH}$ e $C_{res} = 10 \text{ nF}$.

No gráfico da Figura 3.19 encontra-se a simulação da ignição da lâmpada. Para se dar a ignição, a frequência decresce, pelo que a lâmpada deve arrancar perto dos 57 kHz, onde V_{LAMP} se encontra perto dos $1000/\sqrt{2} \text{ V}$. A tensão na lâmpada e a corrente nos filamentos variam proporcionalmente, pelo que, até à ignição, os filamentos são aquecidos. A potência e corrente na lâmpada, neste momento, são nulas.

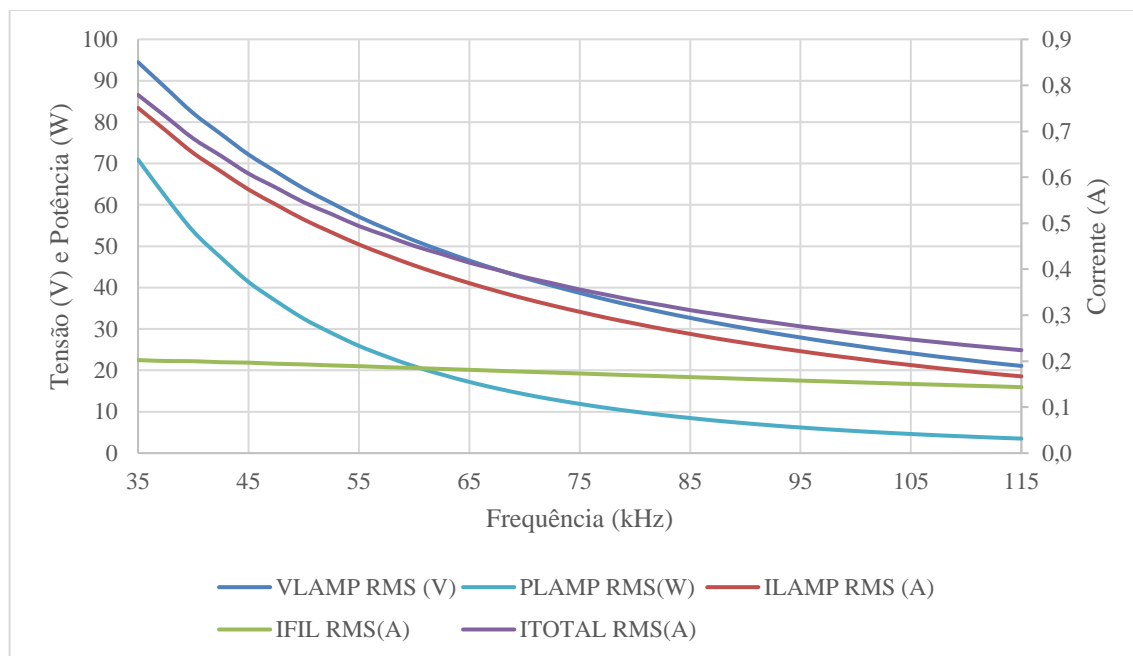


Figura 3.20 - Gráfico da simulação LTSPice da lâmpada em funcionamento, com $L_{res} = 1 \text{ mH}$ e $C_{res} = 10 \text{ nF}$.

No gráfico da Figura 3.20 encontram-se os valores para as diferentes frequências, quando a lâmpada está em funcionamento. Podemos ver que quanto menor a frequência, maior é a potência na lâmpada. Para este conjunto de componentes, não se atinge a potência nominal da lâmpada (75 W).

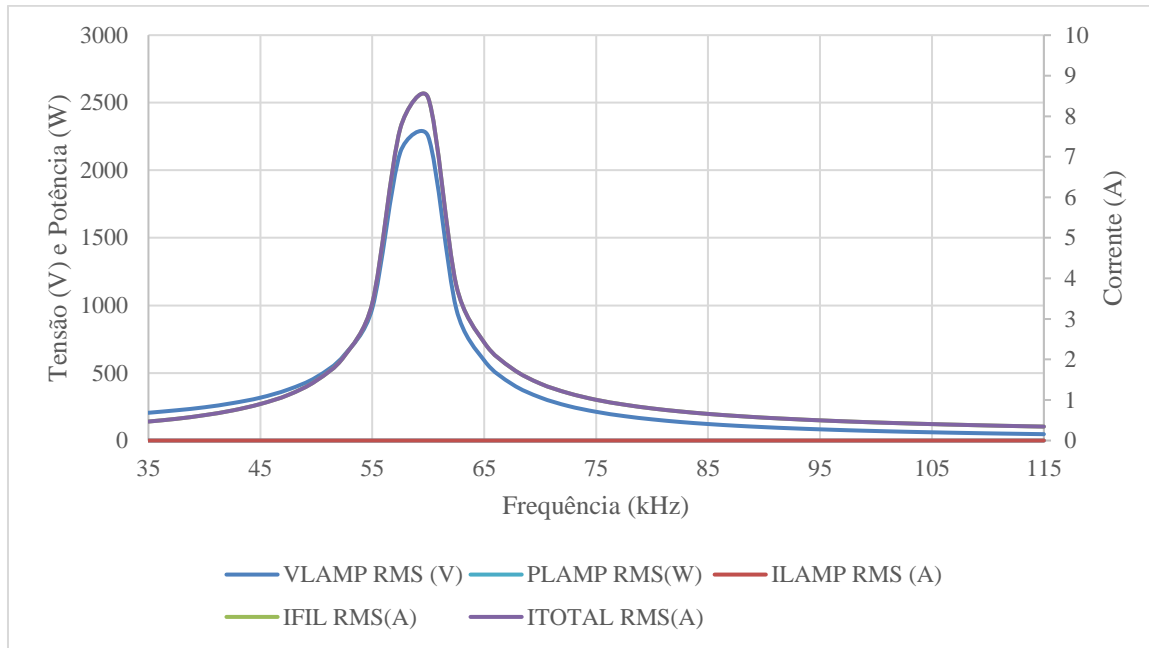


Figura 3.21 - Gráfico da simulação LTSPice da lâmpada em ignição, com $L_{RES} = 0,8 \text{ mH}$ e $C_{RES} = 10 \text{ nF}$.

Ao ser alterado o valor de L_{RES} para $0,8 \text{ mH}$, o gráfico da Figura 3.21 apresenta uma frequência de ressonância superior, com a lâmpada “desligada”. Isso implica também um aumento da frequência de ignição. Esta alteração não parece ser significativa para o arranque da lâmpada.

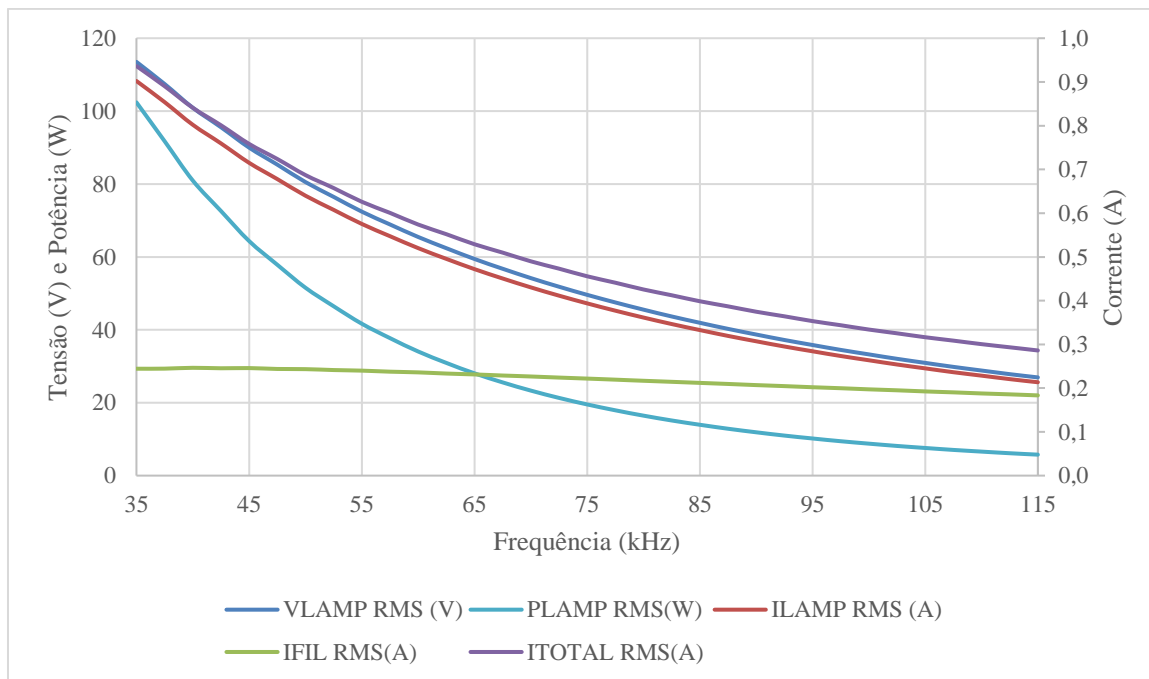


Figura 3.22 - Gráfico da simulação LTSPice da lâmpada em funcionamento, com $L_{RES} = 0,8 \text{ mH}$ e $C_{RES} = 10 \text{ nF}$.

Para o valor de L_{RES} da Figura 3.22 já é possível atingir a potência nominal da lâmpada, o que é aceitável para o nosso objetivo.

3.10.2 Simulação MatLab

As seguintes simulações foram realizadas utilizando o MatLab. O MatLab é um *software* com o propósito de realizar cálculo numérico e construção de gráficos, sendo possível realizar programas para a resolução de problemas matemáticos complexos. Assim, para simular o circuito em estudo, foi necessário deduzir a fórmula matemática que representa a função de transferência do mesmo.

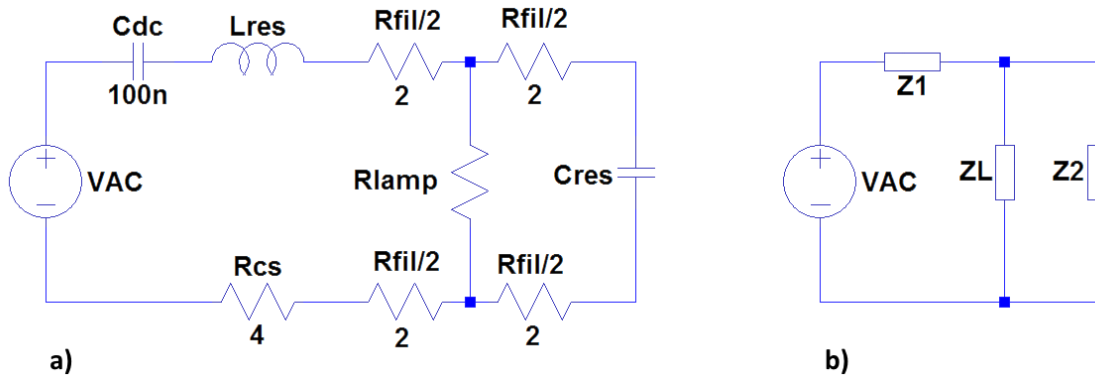


Figura 3.23 - Circuito de ressonância do balastro: a) Circuito completo; b) Circuito simplificado.

A Figura 3.23 a) representa o circuito de ressonância do balastro, considerando que VAC é uma fonte sinusoidal com amplitude 206,9 V. O objetivo desta simulação é analisar os resultados obtidos para confirmar a adequação dos mesmos, validando o circuito antes de realizar o protótipo. Os valores dos componentes são os seguintes:

- $C_{DC} = 100 \text{ nF}$;
- $C_{RES} = 10 \text{ nF}$;
- $R_{FIL} = 4 \text{ } \Omega$;
- $R_{LAMP} = 117,1875 \text{ } \Omega$ (funcionamento);
- $R_{LAMP} = 100000 \text{ M}\Omega$ (ignição);
- $R_{CS} = 4 \text{ } \Omega$.

Na Figura 3.23 b) encontra-se um modelo simplificado, com o objetivo de dividir o circuito em várias equações, deixando-o mais perceptível. A carga Z_1 é definida pela Eq. (3.59), a carga Z_2 pela Eq. (3.60) e a carga Z_L pela Eq. (3.61).

$$Z_1 = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{DC}} + j \cdot \omega \cdot L_{res} + \frac{R_{FIL}}{2} + \frac{R_{FIL}}{2} + R_{CS}$$

$$Z_1 = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{DC}} + j \cdot \omega \cdot L_{res} + R_{FIL} + R_{CS} \quad (3.59)$$

$$Z_2 = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{RES}} + \frac{R_{FIL}}{2} + \frac{R_{FIL}}{2} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{RES}} + R_{FIL} \quad (3.60)$$

$$Z_L = R_{LAMP} \quad (3.61)$$

O objetivo da simulação é obter valores eficazes. Assim, considerando V_{IN} a tensão de VAC e V_{OUT} a tensão aplicada ao paralelo de Z_L e Z_2 , é possível obter as seguintes equações aplicando um divisor de tensão:

- Tensão eficaz de entrada, Eq. (3.62);

$$V_{IN(RMS)} = \frac{206,9}{\sqrt{2}} = 146,3 \text{ V} \quad (3.62)$$

- Tensão eficaz de saída, Eq. (3.63);

$$V_{OUT(RMS)} = \left| \frac{Z_2 \parallel Z_L}{Z_1 + (Z_2 \parallel Z_L)} \right| \times V_{IN(RMS)} = \left| \frac{\frac{Z_2 \times Z_L}{Z_2 + Z_L}}{Z_1 + \frac{Z_2 \times Z_L}{Z_2 + Z_L}} \right| \times V_{IN(RMS)}$$

$$V_{OUT(RMS)} = \left| \frac{Z_2 \cdot Z_L}{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_L) + Z_2 \cdot Z_L} \right| \times V_{IN(RMS)} \quad (3.63)$$

- Corrente eficaz na lâmpada, Eq. (3.64);

$$I_{LAMP(RMS)} = \frac{V_{OUT(RMS)}}{|Z_L|} = \frac{V_{OUT(RMS)}}{R_{LAMP}} \quad (3.64)$$

- Corrente eficaz nos filamentos, Eq. (3.65);

$$I_{FIL(RMS)} = \frac{V_{OUT(RMS)}}{|Z_2|} \quad (3.65)$$

- Corrente eficaz total do circuito de ressonância, Eq. (3.66);

$$I_{TOTAL(RMS)} = \frac{V_{IN(RMS)}}{\left| Z_1 + \frac{Z_2 \times Z_L}{Z_2 + Z_L} \right|} \quad (3.66)$$

- Potência eficaz da lâmpada, Eq. (3.67).

$$P_{LAMP(RMS)} = I_{LAMP(RMS)} \times R_{LAMP(RMS)} \quad (3.67)$$

Deste modo, o programa desenvolvido em MatLab irá resolver estas equações para uma vasta gama de frequências, guardando os resultados em vetores para ser possível apresentar gráficos de $V_{OUT(RMS)}$, $I_{LAMP(RMS)}$, $I_{FIL(RMS)}$, $I_{TOTAL(RMS)}$ e $P_{LAMP(RMS)}$. Este procedimento terá de ser seguido para a ignição ($R_{LAMP} = 100000 \text{ M}\Omega$) e para o funcionamento normal ($R_{LAMP} = 117,1875 \text{ }\Omega$) da lâmpada. Estas equações são apenas válidas para uma tensão de entrada sinusoidal. Isto significa que a potência dos harmónicos não irá ser considerada para os cálculos. A Figura 3.24 apresenta o fluxograma do programa desenvolvido para MatLab.

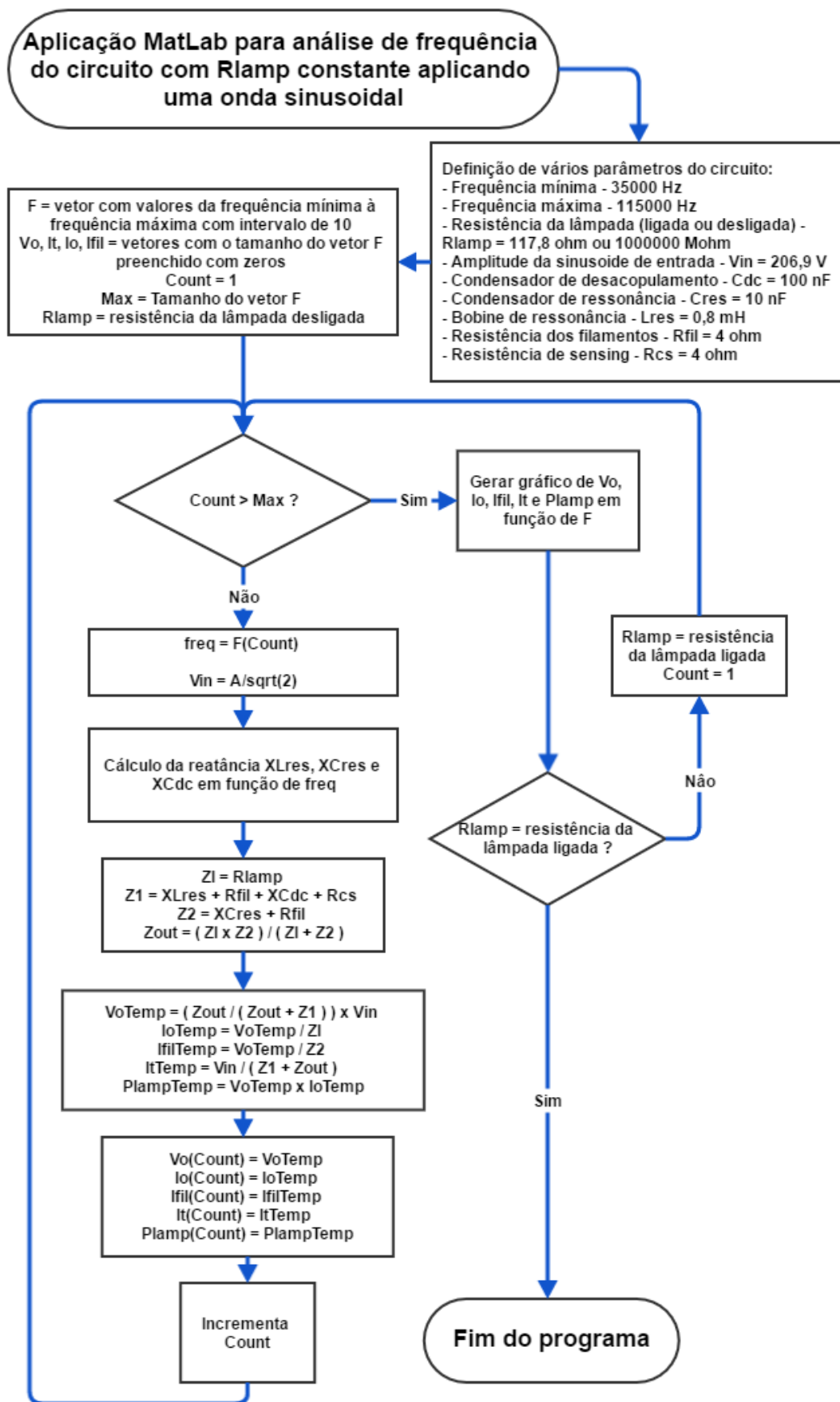


Figura 3.24 - Fluxograma do programa MatLab para análise de frequência do circuito com resistência da lâmpada constante.

Foram executadas simulações com o valor da bobine de ressonância (L_{RES}) igual a 0,8 mH e igual a 0,7 mH, tendo sido obtidos os resultados que se seguem.

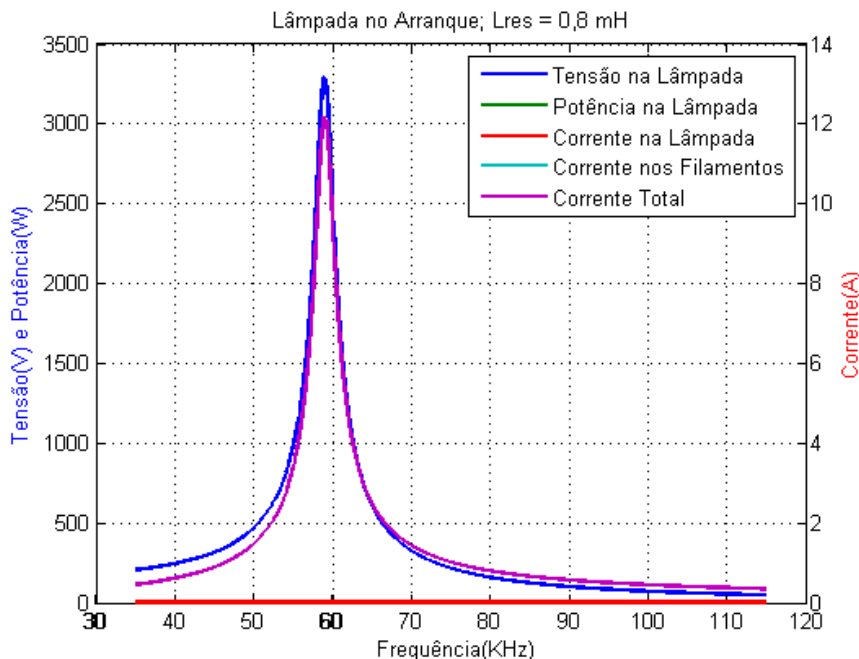


Figura 3.25 - Gráfico da simulação MatLab da lâmpada em ignição, com $L_{res} = 0,8$ mH.

A Figura 3.25 apresenta a fase de ignição, onde pode ser verificado que a corrente na lâmpada é zero, pelo que a corrente total é igual à corrente nos filamentos, que teria um pico de 12 A na frequência de ressonância de 59 kHz. Na mesma frequência, a tensão na lâmpada atingiria 3300 V(RMS). No arranque, nunca é atingida a frequência de ressonância, visto que a amplitude da tensão de ignição (V_{IG}) é de $1000/\sqrt{2}$ V, pelo que a lâmpada irá arrancar perto dos 65 kHz. Assim, a corrente máxima nos filamentos será de 4 A (RMS).

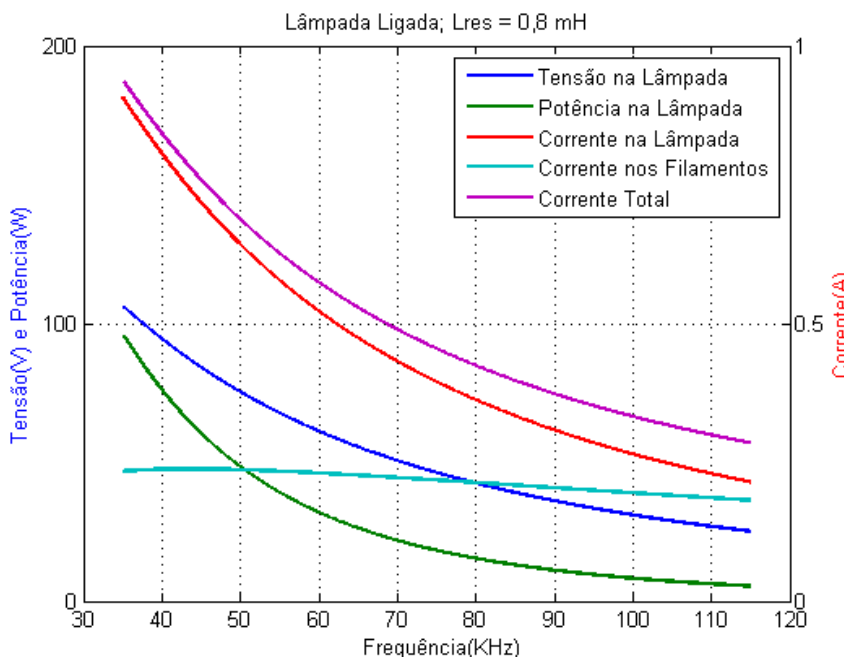


Figura 3.26 - Gráfico da simulação MatLab da lâmpada em funcionamento, com $L_{res} = 0,8$ mH.

A Figura 3.26 apresenta o gráfico da lâmpada em funcionamento com L_{RES} igual a 0,8 mH. Sendo o limite mínimo de frequência 35 kHz, a potência máxima que iremos atingir é de, aproximadamente, 100 W. A lâmpada encontra-se à potência nominal quando a frequência do circuito é de 40 kHz, onde $P_{LA} = 75 W$, $I_{LA} = 0,8 A$ e $V_{LA} = 93,75 V$. A corrente nos filamentos mantém-se aproximadamente nos 250 mA (RMS).

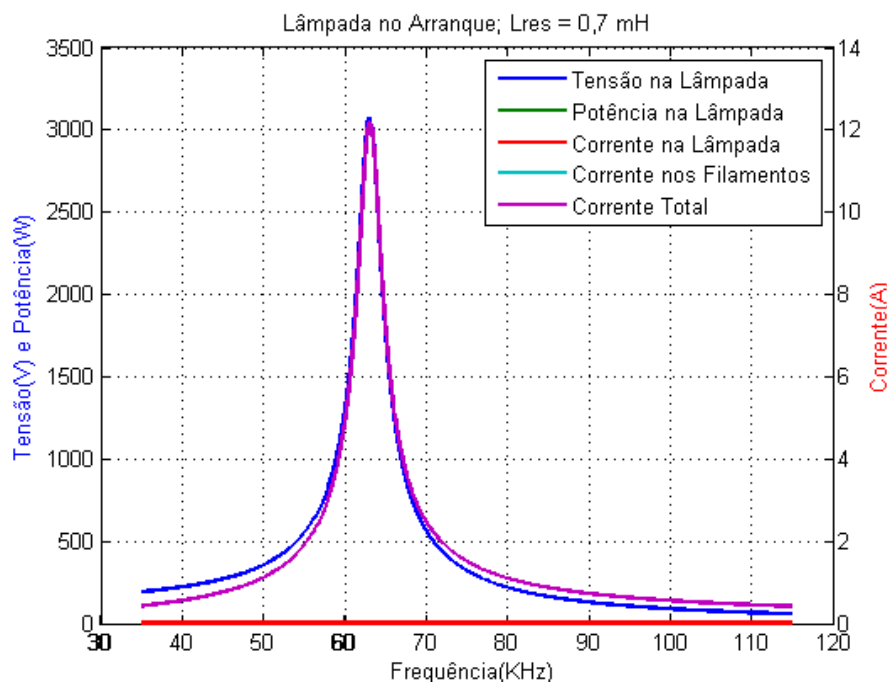


Figura 3.27 - Gráfico da simulação MatLab da lâmpada em ignição, com $L_{res} = 0,7$ mH.

A Figura 3.27 apresenta a fase de ignição, mas agora com L_{RES} igual 0,7 mH. A frequência de ressonância no arranque subiu para 63 kHz, a corrente nos filamentos manteve o pico de 12 A, mas a tensão de pico na lâmpada desceu para aproximadamente 3000 V(RMS). Assim, a lâmpada irá atingir a tensão de ignição ($V_{IG} = 1000/\sqrt{2} V$) aos 68 kHz, com uma corrente nos filamentos de 4 A (RMS).

A Figura 3.28 apresenta o gráfico do funcionamento da lâmpada para a mesma indutância de ressonância. Quando a frequência se encontra no mínimo (35 kHz), a potência máxima da lâmpada é de 120 W. A lâmpada encontra-se na potência nominal quando a frequência do circuito é de 45 kHz. A corrente nos filamentos continua a manter-se perto dos 250 mA.

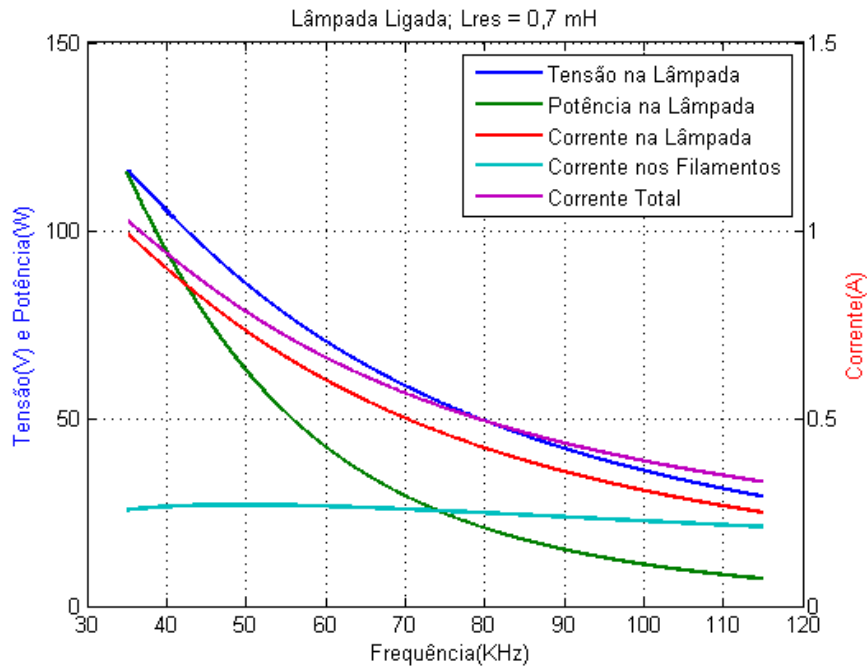


Figura 3.28 - Gráfico da simulação MatLab da lâmpada em funcionamento, com Lres = 0,7 mH.

3.11 Construção e teste do balastro eletrônico

Para a construção do balastro eletrônico, utilizou-se uma placa de circuito impresso perfurada (*proto-board*), que simplifica a implementação do circuito, e a sua alteração posterior, caso necessária. O circuito utilizado foi o da Figura 3.15, do Subcapítulo 3.8, em que os componentes do circuito de ressonância são os seguintes:

- $C_{DC} = 10 \text{ } \mu\text{F}$;
- $C_{RES} = 100 \text{ } \mu\text{F}$;
- $L_{RES} = 0,7 \text{ mH}$.

A Figura 3.29 apresenta o circuito elaborado, com a placa de circuito impresso povoada com os componentes.

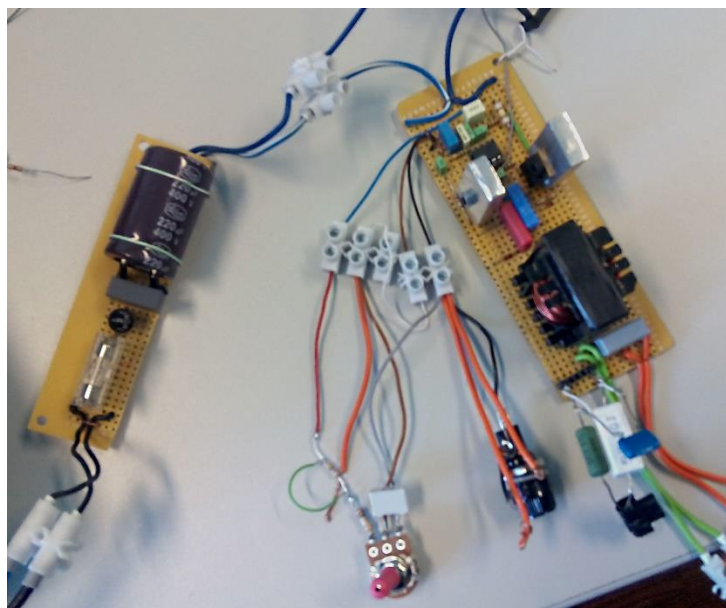


Figura 3.29 - Fotografia do circuito elaborado do balastro eletrônico.

A indutância L_{RES} deve suportar uma corrente de 0,8 A (RMS) com a lâmpada em funcionamento. Assim, de forma a obter um fator de segurança, a bobine deve suportar uma corrente nominal máxima de 2,4 A ($3 \times 0,8$). Não foi possível encontrar à venda nenhuma bobine com estas características, o que criou a necessidade de construção da mesma. Utilizou-se um núcleo ferroso para altas frequências. Este núcleo está separado em duas partes, o que significa que o valor da indutância é maior quando ambas as partes estão em contato. O valor da indutância reduz com o aumento da distância entre ambas as partes do núcleo (entreferro). Deste modo, utilizando um medidor de indutâncias, o fio de cobre foi enrolado no núcleo fechado até o valor de indutância ser igual a 1,2 mH. Em seguida introduziu-se um espaçamento entre as duas partes do núcleo até o valor da bobine ser igual a 0,7 mH. Isto permite, caso necessário, ajustar facilmente o valor da indutância [22]. Na Figura 3.30 encontra-se a bobine construída para o balastro eletrônico desenvolvido.

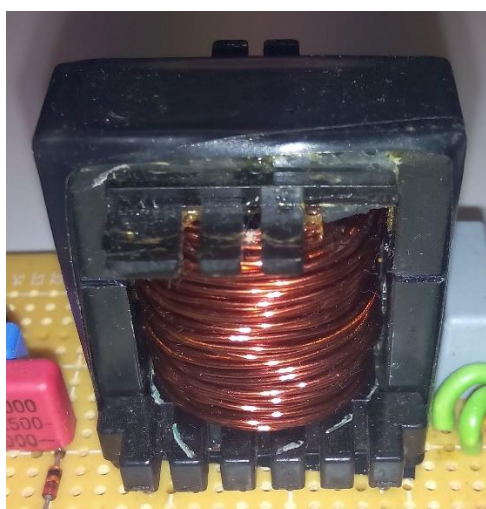


Figura 3.30 - Fotografia da indutância construída para o circuito do balastro eletrônico.

Depois de construído passou-se à fase de testes, pelo que foram efetuadas as ligações ao dispositivo apresentadas na Figura 3.31.

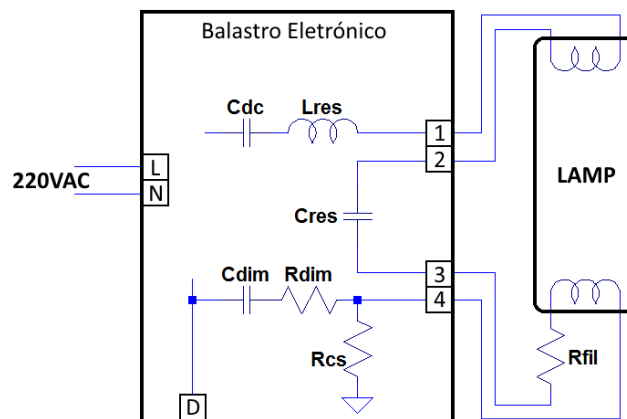


Figura 3.31 - Esquema de ligações do balastro eletrônico.

L e N são a fase e o neutro que alimentam o circuito. D é a entrada de *dimming* do balastro que deve ser uma tensão de 0 a 10 VDC. As saídas do balastro 1 e 2 ligam a um dos filamentos da lâmpada, enquanto as saídas 3 e 4 ligam ao restante filamento da lâmpada.

Para testar o bom funcionamento do balastro e a sua interação com a lâmpada, as componentes mais importantes a medir são V_{LAMP} (tensão na lâmpada), I_{LAMP} (corrente na lâmpada), I_{FIL} (corrente nos filamentos) e I_{TOTAL} (corrente total). Estes foram medidos utilizando um osciloscópio. Não é possível medir a corrente na lâmpada diretamente, isto porque a corrente que “entra” na lâmpada é a soma da corrente nos filamentos com a corrente da lâmpada. Assim, será subtraída à corrente instantânea total a corrente instantânea dos filamentos, para se obter a corrente instantânea na lâmpada.

O osciloscópio apenas mede tensão, por isso para medir a corrente total mediu-se a tensão aos terminais da resistência R_{CS} , que é usada como retorno para o controle de *dimming* do balastro. Deste modo, realizando o cálculo $I_{TOTAL} = V_{RCS}/R_{CS}$, sendo $R_{CS} = 3,9 \Omega$, obtém-se o valor da corrente total do circuito. A corrente nos filamentos é medida através da tensão na resistência R_{FIL} , que foi adicionada posteriormente ao circuito, em série com o condensador C_{RCS} . Neste condensador apenas flui a corrente dos filamentos. Assim, o cálculo da corrente nos filamentos é realizado com $I_{FIL} = V_{RFIL}/R_{FIL}$.

Utilizando o osciloscópio, foram adquiridos os valores instantâneos de V_{LAMP} , V_{RCS} , e V_{RFIL} . Como os pontos de medição de V_{LAMP} e V_{RCS} não têm a referência comum com os pontos de medição de V_{RFIL} , e o osciloscópio usado apenas possui dois canais, as medições foram realizadas separadamente. A referência do osciloscópio teve que ser desligada para evitar curto-circuitos entre a terra e a alimentação do balastro. Alternativamente poderia ter-se utilizado pontas de prova diferenciais.

A frequência do circuito foi alterada através de V_{DIM} , que se encontra ligado à entrada D do balastro. Para cada frequência obteve-se um ficheiro CSV (Excel) com os valores instantâneos de V_{LAMP} , V_{RCS} e V_{RFIL} .

No Anexo III encontram-se um exemplo (para a frequência de 40KHz) dos ficheiros Excel contendo os valores instantâneos das grandezas medidas neste teste.

3.12 Processamento dos dados adquiridos

Depois de obtidos os ficheiros CSV (Excel) dos valores instantâneos de V_{LAMP} , V_{RCS} e V_{RFIL} , em diferentes frequências, efetuaram-se os cálculos referidos anteriormente, para se obterem os valores instantâneos de I_{TOTAL} , I_{FIL} e I_{LAMP} . Em seguida, para cada frequência, é pretendido obter os valores eficazes (RMS) de V_{LAMP} , I_{TOTAL} , I_{FIL} e I_{LAMP} . Para isso selecionaram-se os valores instantâneos de um período e fez-se o cálculo da raiz quadrada da média dos quadrados destes valores.

Assim, depois deste processamento, elaborou-se a Tabela 3.2, que apresenta os valores eficazes em relação à frequência, e o gráfico respetivo na Figura 3.32. Foram adicionados os valores calculados da potência e da resistência da lâmpada.

Tabela 3.2 - Valores eficazes do teste do balastro, em função da frequência.

Freq. (kHz)	$V_{LAMP\ RMS}$ (V)	$I_{TOTAL\ RMS}$ (A)	$I_{FIL\ RMS}$ (A)	$I_{LAMP\ RMS}$ (A)	$P_{LAMP\ RMS}$ (W)	R_{LAMP} (Ω)
35	82,82	1,11	0,18	0,97	80,48	85,21
40	88,17	0,90	0,23	0,74	65,11	119,39
45	91,07	0,79	0,26	0,58	52,49	157,98
50	91,28	0,73	0,29	0,50	45,65	182,51
55	95,84	0,68	0,29	0,42	39,85	230,48
60	103,34	0,64	0,33	0,35	35,67	299,38
65	110,71	0,63	0,37	0,32	35,92	341,23
70	122,09	0,64	0,44	0,24	29,24	509,74
75	132,89	0,66	0,61	0,18	24,38	724,22
80	174,11	0,86	0,87	0,09	16,20	1870,92
83	148,52	0,79	0,78	0,09	13,29	1660,11
86	126,79	0,70	0,70	0,10	13,11	1226,57
90	103,14	0,60	0,63	0,14	14,44	736,69
120	43,61	0,35	0,35	0,09	3,73	510,05

Visto que, para a lâmpada, o fator de potência é considerado igual a um, $P_{LAMP} = V_{LAMP} \times I_{LAMP}$ e $R_{LAMP} = P_{LAMP} / I_{LAMP}^2$.

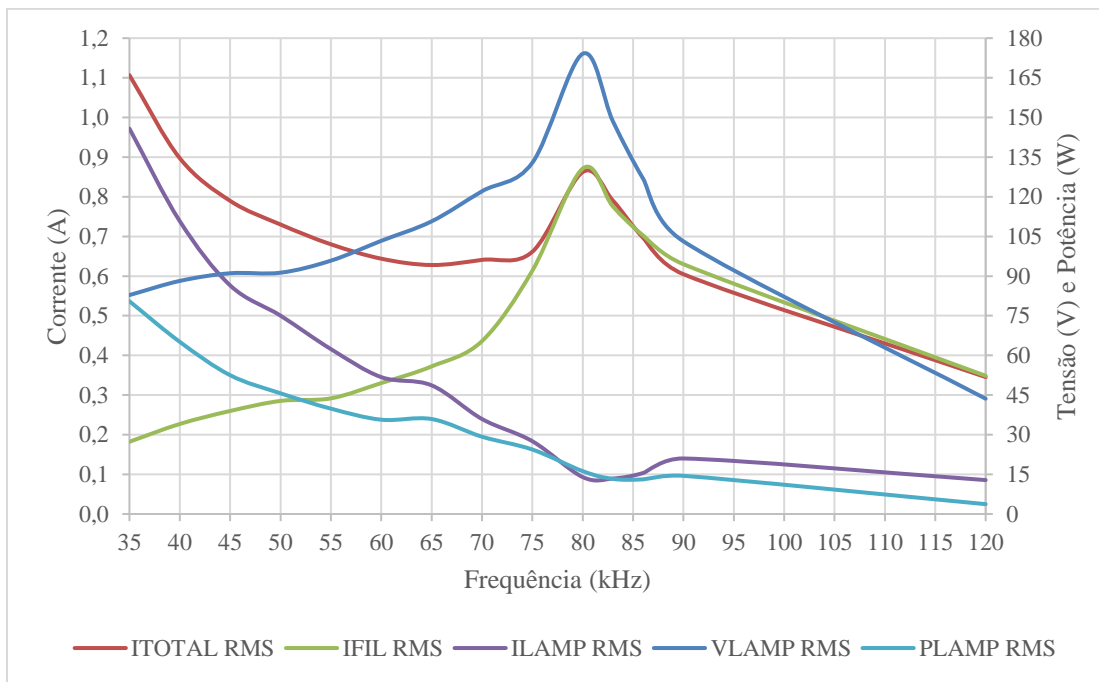


Figura 3.32 - Gráfico dos valores eficazes do teste do balastro, com base na Tabela 3.2.

No gráfico da Figura 3.32 é possível observar que, a partir de 80 kHz, existe uma zona em que não foi possível obter resultados. Isto deve-se ao facto da lâmpada se encontrar “desligada” nesta zona. Como a corrente que flui na resistência de retorno R_{CS} é igual à corrente total do circuito, o circuito integrado de controlo não assume que a lâmpada está desligada, pois ainda flui a corrente dos filamentos. Os resultados obtidos são válidos dos 35 aos 80 kHz, pois a corrente nos filamentos mantém-se aproximadamente constante com o valor de 0,2 A (RMS). Assim, este circuito é adequado para uma variação de potência na lâmpada, entre 107% e 20% da potência nominal.

Sendo o objetivo obter uma função que relacione a resistência da lâmpada com a sua corrente, foi elaborado um gráfico no Excel da resistência em função da corrente, com os dados da Tabela 3.2. Adicionou-se uma linha de tendência que é muito semelhante à curva real. Esta curva é representada pela função apresentada na Eq. (3.68).

$$R_{LAMP} = A \cdot e^{B \cdot I_{LAMP}} + C \quad (3.68)$$

As constantes A, B e C, da Eq. (3.68), são dependentes da lâmpada, sendo que para a lâmpada utilizada têm os seguintes valores:

- A = 1500;
- B = -5;
- C = 70.

De forma a confirmar que a Eq. (3.68) pode ser utilizada para representar a lâmpada real, esta foi aplicada numa simulação em MatLab, por forma a ser possível comparar os resultados da simulação com os resultados obtidos experimentalmente.

3.13 Simulação MatLab com função obtida

O próximo passo foi criar um programa em MatLab para simular a lâmpada, tendo em consideração a fórmula obtida na análise anterior. Este programa foi baseado no programa anterior, em que era considerado a resistência da lâmpada constante. Ao utilizar as equações simuladas neste programa e introduzindo a Eq. (3.68), ficamos com a Eq. (3.69):

$$\begin{aligned}
 I_{LAMP} &= \frac{V_{OUT}}{R_{LAMP}} = \frac{\left| \frac{Z_{OUT}}{Z_1 + Z_{OUT}} \right| \times V_{IN}}{R_{LAMP}} \\
 I_{LAMP} &= \frac{\left| \frac{(R_{LAMP} \times Z_2) / (R_{LAMP} + Z_2)}{Z_1 + (R_{LAMP} \times Z_2) / (R_{LAMP} + Z_2)} \right| \times V_{IN}}{R_{LAMP}} \\
 I_{LAMP} &= \frac{\left| \frac{((A \cdot e^{B \cdot I_{LAMP}} + C) \times Z_2) / ((A \cdot e^{B \cdot I_{LAMP}} + C) + Z_2)}{Z_1 + ((A \cdot e^{B \cdot I_{LAMP}} + C) \times Z_2) / ((A \cdot e^{B \cdot I_{LAMP}} + C) + Z_2)} \right| \times V_{IN}}{A \cdot e^{B \cdot I_{LAMP}} + C} \quad (3.69)
 \end{aligned}$$

Para ser possível simular o sistema assim representado, seria necessário resolver a Eq. (3.69) de forma fechada para I_{LAMP} . Devido à maior complexidade desta tarefa, optou-se por realizar a simulação criando uma solução iterativa.

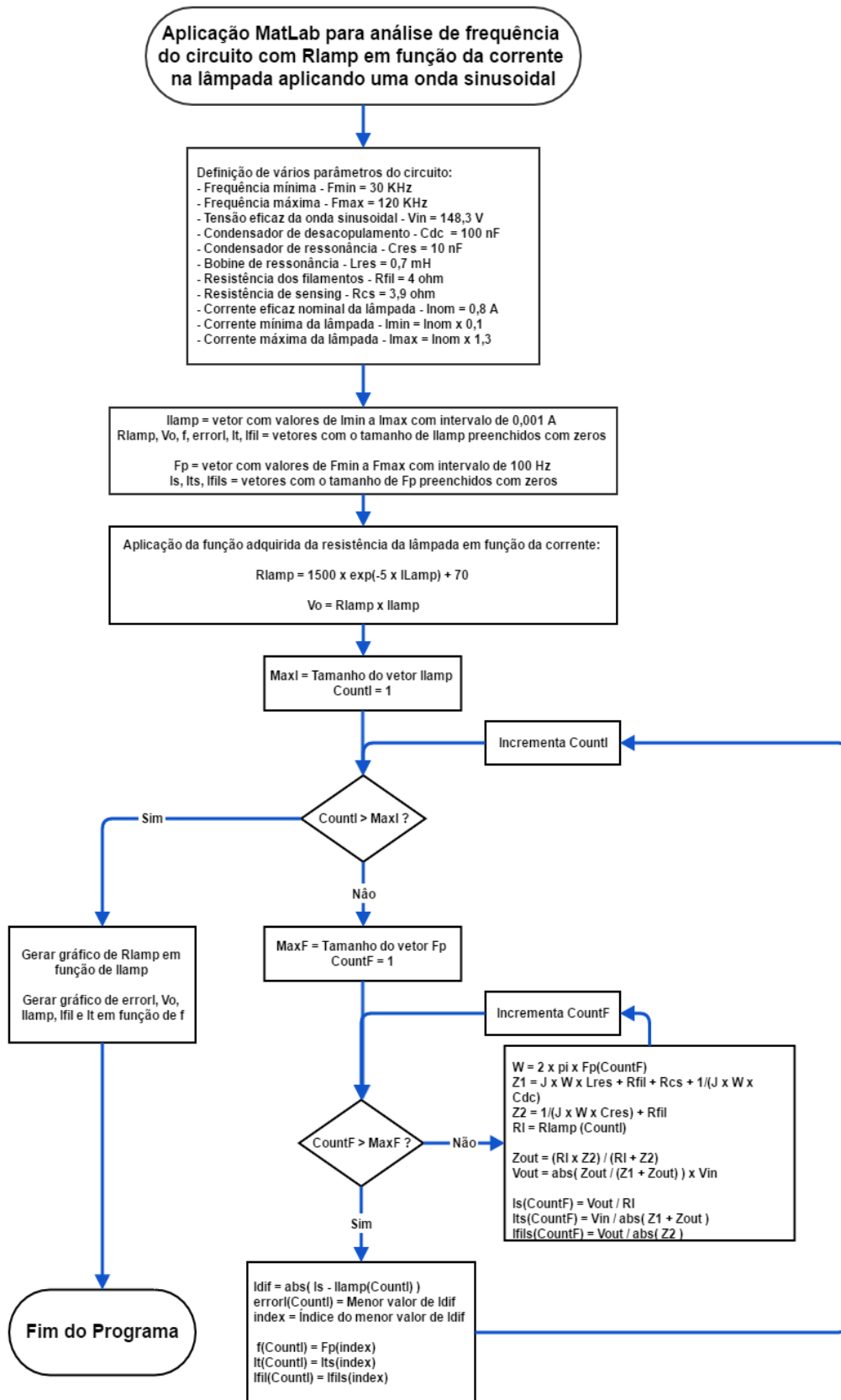


Figura 3.33 - Fluxograma do programa MatLab para análise de frequência do circuito com resistência da lâmpada dinâmica.

A Figura 3.33 apresenta o fluxograma do programa realizado em MatLab, para solucionar este problema. Visto que a corrente da lâmpada decresce com o aumento da frequência, começou-se por criar um *array* com os valores possíveis de I_{LAMP} . Neste caso, o *array* contém valores no intervalo de 10% a 120% da corrente nominal da lâmpada, com um espaçamento de 0,001 A. Em seguida, fez-se o cálculo para obter o *array* correspondente de R_{LAMP} e o *array* correspondente de V_O (tensão na lâmpada), multiplicando R_{LAMP} por I_{LAMP} , uma vez que a esta frequência o fator de potência é aproximadamente 1.

Assim, são necessários os dados da frequência, I_{TOTAL} e I_{FIL} , para cada valor de I_{LAMP} , de modo a obter resultados comparáveis com os resultados experimentais. Foi criado um *array* com valores de frequência de f_{MIN} (30 kHz) a f_{MAX} (120 kHz), com um espaçamento de 100 Hz.

Para cada valor de R_{LAMP} , aplicou-se a primeira simulação que realiza os cálculos para cada valor de frequência. No final de cada simulação comparam-se todos os valores do *array* de I_{LAMP} com o I_{LAMP} correspondente ao R_{LAMP} usado, e guardam-se os valores de f , I_{TOTAL} e I_{FIL} para cada I_{LAMP} .

Isto implementa o sistema iterativo que no final nos devolve um gráfico comparável com o gráfico experimental, com as seguintes variáveis: V_O , I_{LAMP} , I_{FIL} e I_{TOTAL} em função de f .

3.14 Comparação de resultados experimentais com resultados da simulação MatLab

Na Figura 3.34 e na Figura 3.35 encontram-se os gráficos do teste experimental do dispositivo construído e da simulação realizada em MatLab, respetivamente. A simulação em MatLab rege-se pela Eq. (3.70).

$$R_{LAMP} = 1500 \times e^{-5 \times I_{LAMP}} + 70 \quad (3.70)$$

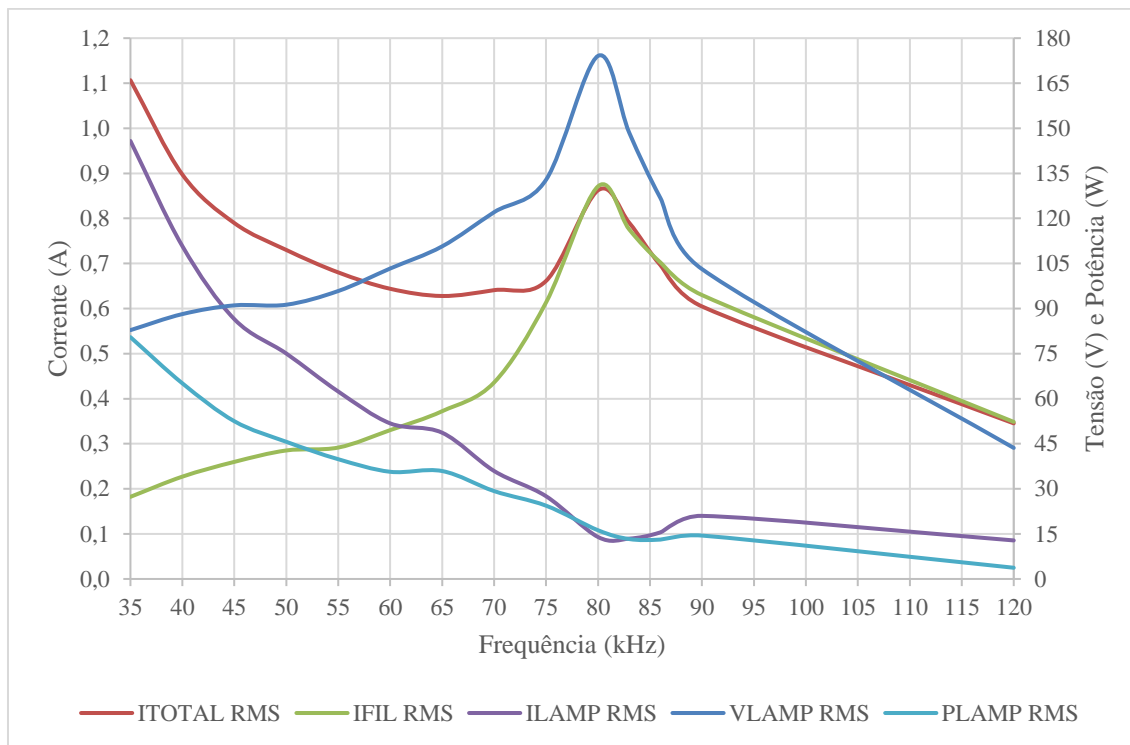


Figura 3.34 - Gráfico dos valores eficazes do teste do balastro.

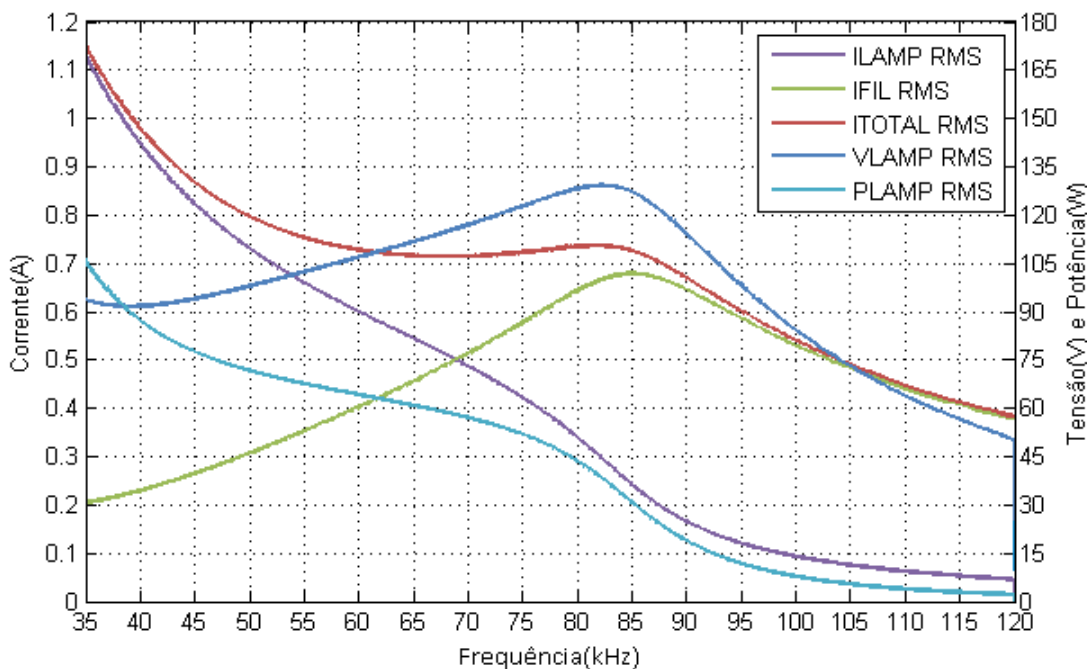


Figura 3.35 - Gráfico dos valores eficazes da simulação MatLab do balastro.

Tal como foi referido anteriormente, existe claramente uma relação entre a corrente que flui pela lâmpada fluorescente e a sua resistência. Vários autores propuseram equações para relacionar estas duas variáveis, mas em geral apenas funcionam entre 100% e 30% da potência nominal [10] [14] [21]. Estas equações contêm constantes importantes que só podem ser obtidas experimentalmente, pois dependem da lâmpada a modelizar.

Assim, ao observar os gráficos do funcionamento do balastro na Figura 3.34 e na Figura 3.35, podemos concluir que a Eq. (3.70) define uma boa aproximação ao comportamento da lâmpada utilizada. Como apenas foi testada uma lâmpada, a Eq. (3.70) é somente válida para esta lâmpada particular. No gráfico da Figura 3.34 é possível observar a ausência de resultados para as frequências acima de 80 kHz, sendo que a variação de potência da lâmpada foi bem sucedida para potências entre 107% e 20% da sua potência nominal. Desta forma, a Eq. (3.70) é válida apenas para esta gama de potências.

Os resultados obtidos para o balastro desenvolvido e construído foram validados por simulação e experimentalmente para um funcionamento com potências da lâmpada entre 107% e 20%. Esta gama de variação é adequada ao objetivo de utilização deste balastro num sistema de desinfecção UVC, permitindo ajustar dinamicamente a potência da lâmpada para se adaptar ao caudal do líquido, assim como compensar a redução de potência de radiação resultante do envelhecimento da lâmpada.

4 Programação e comissionamento de uma célula robotizada

Este capítulo apresenta um trabalho desenvolvido para a empresa onde decorreu o estágio, que consistiu na programação e comissionamento de uma célula robotizada, como parte integrante de um projeto de uma máquina para automação industrial produzida na empresa.

Os primeiros quatro subcapítulos apresentam uma introdução à robótica industrial tal como esta é presentemente aplicada na indústria. Os restantes subcapítulos apresentam o robô industrial estudado e aplicado no projeto da máquina através da descrição das suas diversas componentes [23], a programação desenvolvida para cumprir os objetivos funcionais da máquina, assim como o seu comissionamento no ambiente de produção do cliente, numa unidade industrial em Espanha.

4.1 História da robótica industrial

A palavra “robô” tem origem na palavra Checa “robota” que significa trabalho forçado ou servo. Foi pela primeira vez utilizada numa peça de teatro, escrita pelo Checo Karl Capek, em 1921. A peça retratava homens mecânicos construídos para trabalhar numa linha de montagem de uma fábrica, que acabam por se revoltar contra os seus mestres humanos. Mais tarde em 1942, Isaac Asimov, escritor Americano de naturalidade Russa, publicou um livro chamado “Runaround” onde apareceu pela primeira vez a palavra “robótica”. Asimov destacou-se como escritor de ficção científica e pelas três leis da robótica que, na sua opinião, devem definir o comportamento de um robô.

Em 1954, George Devol criou a patente de um equipamento chamado “*Programmed Article Transfer*” (Máquina de Transferência Programada), cuja principal função era a transferência de objetos de um ponto para o outro. George Devol juntou-se a Joseph Engelberger e criaram a primeira empresa de robôs industriais chamada UNIMATION. Assim, em 1961 a UNIMATION instalou o primeiro robô industrial, chamado “Unimate”, numa fábrica da General Motors em New Jersey [24].



Figura 4.1 - Primeiro robô industrial "Unimate" [24].

Este foi o primeiro passo para a evolução da robótica industrial, destacando-se posteriormente os seguintes eventos:

- Em 1969, na Universidade de Stanford, Victor Scheinman criou o primeiro robô articulado de 6 eixos que ficou conhecido como o “Braço de Stanford”. Isto permitiu a execução de aplicações mais complexas, tais como montagem ou soldagem. Victor Scheinman vendeu o seu projeto à UNIMATION que, com o auxílio da General Motors, desenvolveu e comercializou o PUMA (Programable Universal Machine for Assembly);
- Em 1973 a empresa KUKA Robotics criou o seu primeiro robô industrial de 6 eixos chamado FAMULUS;
- Em 1974 a empresa Cincinnati Milacron introduz o primeiro robô industrial controlado por computador denominado T3 (*The Tomorrow Tool*).

4.2 Robótica industrial no presente

Um robô industrial é um dispositivo mecânico que, até certo ponto, consegue replicar movimentos humanos. É oficialmente definido pela ISO como um manipulador multiuso controlado automaticamente, reprogramável, como três ou mais eixos. São normalmente utilizados quando há necessidade de executar uma ação potencialmente perigosa para um ser humano, pois conseguem ter mais força e precisão. Também são utilizados quando é necessário executar uma ação contínua e repetitiva durante muitas horas. A maioria dos robôs industriais são fixos, existindo alguns com a capacidade de se movimentar na área de trabalho.

Contrariamente ao que se pode pensar, os robôs industriais tiveram como modelo o braço humano e a sua capacidade apenas depende daquilo que lhe é programado. Para programar de forma fácil e econômica um robô industrial, muitas variáveis, tais como posição, localização de obstáculos, etc., têm que ser limitadas ou até eliminadas. Isto porque o programador vai ter de prever todas as situações que possam ocorrer, para que o robô execute a sua função sempre de forma ótima.

4.3 Vantagens e desvantagens da robótica industrial

Vantagens:

- Aumento da produtividade e eficiência;
- Baixo custo;
- Elevada vida útil e manutenção reduzida e facilitada;
- Rápido retorno sobre o investimento;
- Possibilidade de trabalhar 24 horas por dia, 365 dias por ano;
- Operação em ambientes difíceis e perigosos;
- Execução de tarefas repetitivas e desagradáveis para o ser humano, sem perda de produtividade;
- Melhoria da qualidade do produto devido à sua padronização;
- Evita desperdícios.

Desvantagens:

- Diminuição de empregos não qualificados no setor industrial;
- Risco associado à operação do robô;

4.4 Aplicações de robótica industrial

Os robôs industriais têm-se revelado essenciais em vários processos industriais, ao longo das últimas décadas. A sua versatilidade tornou-os uma ferramenta aplicada em inúmeras situações.

Em seguida encontram-se várias aplicações em que são utilizados robôs industriais:

- Células robotizadas de paletização: contagem e paletização de caixas, sacos e outros volumes, proporcionando um alto rendimento em linhas finais de produção e expedição de produtos acabados;
- Robô de soldadura: soldagem tipo MIG, TIG, laser, etc, podendo-se integrar em operações antecedentes a pintura, acabamento, corte, etc.
- Robô de pintura: pintura a *spray*, pó eletroestático e tipo KTL, proporcionando alta performance, deixando todas as pinturas idênticas;
- Manipulação: posicionamento de peças do tipo *pick-and-place*, embalagem de caixas, compactação e agrupamento de volumes, etc.;
- Inspeção em linhas de produção: inspeção de características do produto e controlo de qualidade através de sistemas de visão;
- Cargas e descargas: carga, posicionamento e descarga de peças prontas em prensas, injetoras e máquinas de processamento em geral.

4.5 Robô industrial aplicado no projeto

O robô utilizado para este projeto é da empresa KUKA Robotics da gama Agilus. Esta gama consiste em robôs de pequeno porte, compactos e com pouca capacidade de carga, no entanto consegue executar tarefas com agilidade a altas velocidades.

O modelo do robô é KR 10 R1100 sixx e tem uma capacidade de carga máxima de 10 kg e um alcance de 1100mm. É um robô de 6 eixos e tem uma precisão de $\pm 0,03$ mm. O controlador é o mesmo de todos os robôs KUKA denominado de KR C4, sendo que para esta gama é a versão compacta chamada KR C4 COMPACT.

O robô industrial é composto por vários componentes que estão enumerados no diagrama da Figura 4.2, sendo estes:

1. Manipulador: robô ou braço robótico;
2. Unidade manual de programação “smartPAD”: consola para movimentação e programação do robô;
3. Cabo de conexão “smartPAD”: cabo para ligação do “smartPAD” à unidade de controlo do robô;
4. Unidade de comando do robô: controlador que faz a gestão de todas as ações do robô, tendo incluído os controlos de potência dos motores do robô;
5. Cabo de conexão de dados do robô: cabo de comunicação entre o manipulador e a unidade de controlo enviando o estado de vários componentes, tais como os *encoders*;
6. Cabo de conexão dos motores: cabo de ligação entre manipulador e unidade de controlo para controlo de potência dos motores do manipulador.

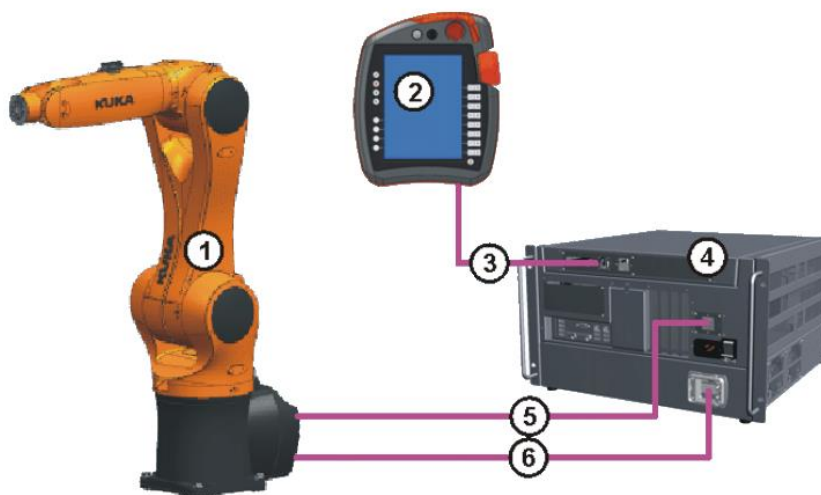


Figura 4.2 - Diagrama dos componentes e ligações do robô KUKA, adaptado de [23].

Como já foi referido anteriormente, o KR C4 COMPACT é a unidade de controlo do robô, sendo uma das componentes essenciais para o funcionamento do robô industrial. Esta é constituída pelos seguintes componentes:

- Computador para gestão de quase todos os processos;
- Unidade de potência para controlo dos motores;
- Lógica de segurança para que o robô industrial não fique suscetível a falhas do computador que possam ocorrer;
- Painel de conexão para ligação de todos os dispositivos necessários.

Além das ligações já referidas, a unidade de controlo tem outras conexões que não são menos importantes. A Figura 4.3 ilustra o painel de conexão da unidade de controlo com todos os conectores que nela existem.

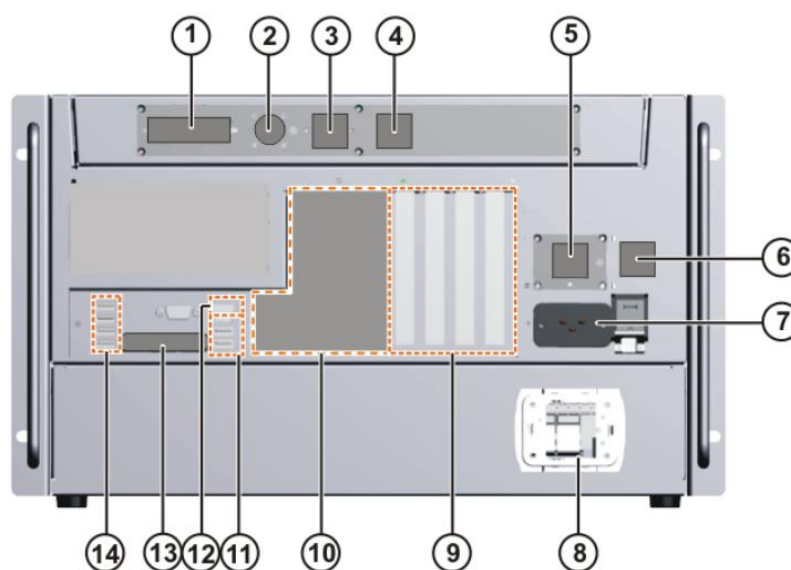


Figura 4.3 - Painel de conexão da unidade de controlo KR C4 COMPACT, adaptado de [23].

Os conectores apresentados na Figura 4.3 são os seguintes:

1. X11 Interface de segurança: os dispositivos de paragem de emergência devem estar ligados através desta *interface* ou interligados entre si através de unidades de comando superiores, como PLCs;
2. X19 Conexão SmartPAD: serve para a conexão da unidade manual de programação smartPAD;
3. X65 *Extension Interface*: é a *interface* para a conexão de EtherCAT *slaves* fora da unidade de controlo;
4. X69 *Service Interface*: é utilizado para a conexão de um computador externo para diagnóstico, configuração, programação, atualizações, entre outros, ou para comunicação com outros dispositivos, como PLCs;
5. X21 *Interface* do manipulador: conexão de dados ao manipulador para receção de estados, tais como estados dos *encoders*;
6. X66 Interface de segurança *ethernet*: destina-se à conexão de um computador externo para instalação, programação, *debugging* e diagnóstico. Apenas deve ser utilizada por técnicos da KUKA Robotics;
7. X1 Conexão de rede: alimentação monofásica do robô;
8. X20 Conector de motor: conexão de potência ao manipulador para controlo de motores;
9. *Slots* de computador opcionais;
10. Cobertura das placas de *bus* de campo;
11. USB;
12. KUKA *Option Network Interface* (Interface de rede opcional KUKA);
13. DVI-I;
14. USB.

4.6 Interface de segurança X11

A *Interface* de segurança X11 é muito importante para garantir a segurança da célula robotizada. Todos os dispositivos de paragem de emergência da célula devem estar ligados a ela para garantir a paragem do robô em qualquer situação anormal ou de perigo. A X11 consiste numa série de contactos normalmente fechados que iram despoletar o evento correspondente no robô, na interrupção de um deles.

Na Figura 4.4 encontra-se o esquema de ligações da *Interface* de segurança X11. Os contactos ligados à porta X406 são contactos de saída para verificação externa do estado do robô. Os restantes devem estar ligados a dispositivos de paragem de emergência. Existem seguranças para várias situações, sendo que cada situação tem duas saídas (redundantes), canal A e B que devem estar ligadas às saídas de teste A e B correspondentes. Caso os dois contactos sejam abertos, a unidade de controlo irá realizar a medida de segurança correspondente à situação. Caso apenas um dos contactos seja aberto, a consola “smartPAD” irá apresentar um erro indicando a falha do sistema de segurança, bloqueando qualquer movimento do robô, sendo necessário reiniciar a unidade de controlo para rearmar o robô.

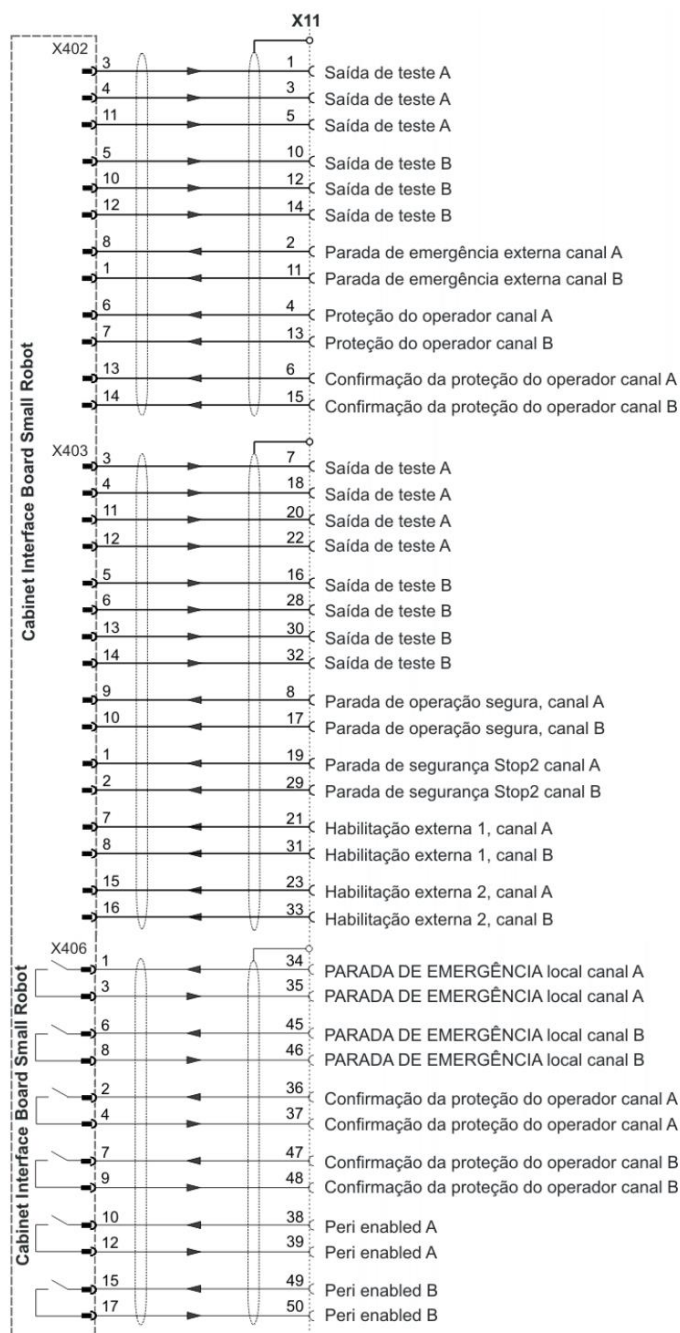


Figura 4.4 - Esquema de ligações da Interface de segurança X11 [23].

Os contactos disponíveis na Interface X11 podem indicar as seguintes situações:

- Paragem de emergência externa: botão de emergência pressionado, ativando a função de paragem de emergência na unidade de controlo;
- Proteção do operador: significa que o operador se encontra na zona de trabalho do robô, desligando os acionamentos do robô;
- Confirmação da proteção do operador: quando o operador já não se encontra na zona de trabalho do robô, deve confirmar a sua saída (normalmente pressionando um botão), para que os acionamentos do mesmo voltem a ser ligados. Esta opção pode ser configurada no *software* da unidade de controlo;

- Paragem de operação segura: pára o robô de forma segura monitorizando a sua paragem;
- Paragem de segurança Stop2: pára o robô de forma segura monitorizando a sua paragem;
- Habilitação externa 1: para conexão de um interruptor de habilitação do robô;
- Habilitação externa 2: para conexão de um interruptor de habilitação do robô.

A aplicação de todas estas seguranças não é obrigatória. Caso algum destes contactos não seja utilizado deve ser ligado diretamente à saída de teste correspondente.

As saídas que indicam os estados de segurança do robô também são redundantes e indicam as seguintes situações:

- Paragem de emergência local: significa que o botão de emergência que se encontra na consola “smartPAD” foi pressionado;
- Confirmação da proteção do operador: tem como objetivo a repetição do sinal de confirmação de proteção do operador para outros robôs que se encontram na mesma cerca de proteção;
- *Peri enabled*: indica que não existem problemas com o robô e que este se encontra com os acionamentos ligados, estando pronto para operar.

4.7 Software de configuração e programação “WorkVisual”

O *software WorkVisual* é disponibilizado gratuitamente pela KUKA Robotics e consiste num ambiente gráfico de engenharia para células robotizadas controladas pela unidade de controlo KR C4. Este ambiente dispõe as seguintes funcionalidades:

- Configurar e ligar *bus* de campo;
- Programar robôs *offline*;
- Configurar dados de máquina;
- Configurar *RoboTeams offline*;
- Editar a configuração de segurança;
- Transmitir projetos para a unidade de comando do robô;
- Carregar projetos da unidade de comando do robô;
- Comparar dois projetos revelando as diferenças;
- Administrar textos descritivos / comentários;
- Gerir pacote de opções;
- Realizar diagnósticos;
- Exibir informações de sistema sobre a unidade de comando do robô *online*.

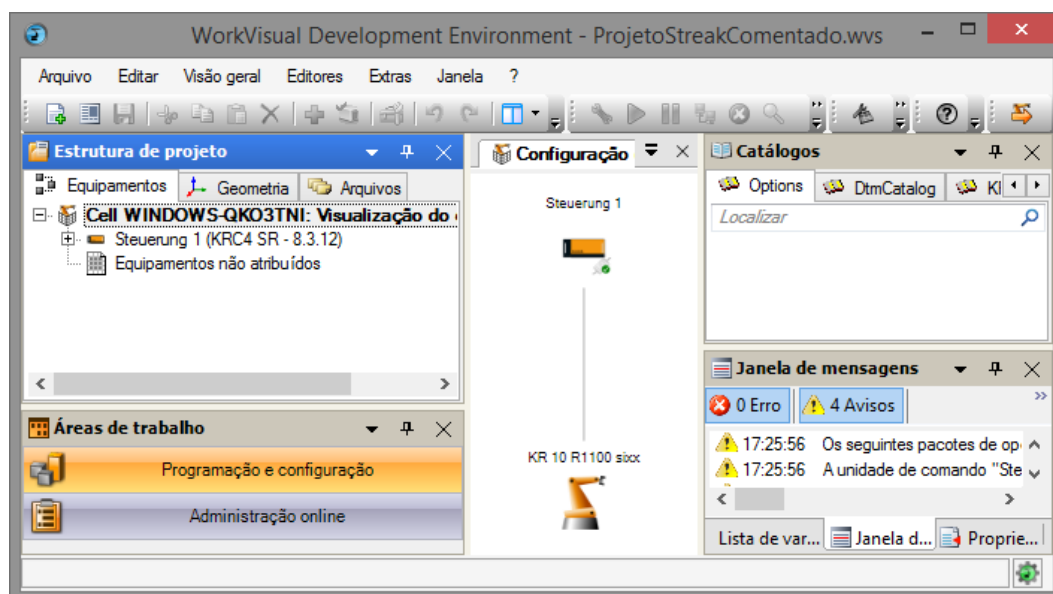


Figura 4.5 - Interface gráfica de utilizador do software "WorkVisual".

A Figura 4.5 apresenta a *interface* gráfica do utilizador. Nas áreas de trabalho temos a opção de “Programação e configuração”, e “Administração *online*”. Na primeira temos, na “Estrutura de projeto”, o separador “Equipamentos”, onde é possível realizar configurações de sistema do robô. Em “Arquivos” encontram-se todos os ficheiros do projeto onde é possível programar a unidade de controlo.

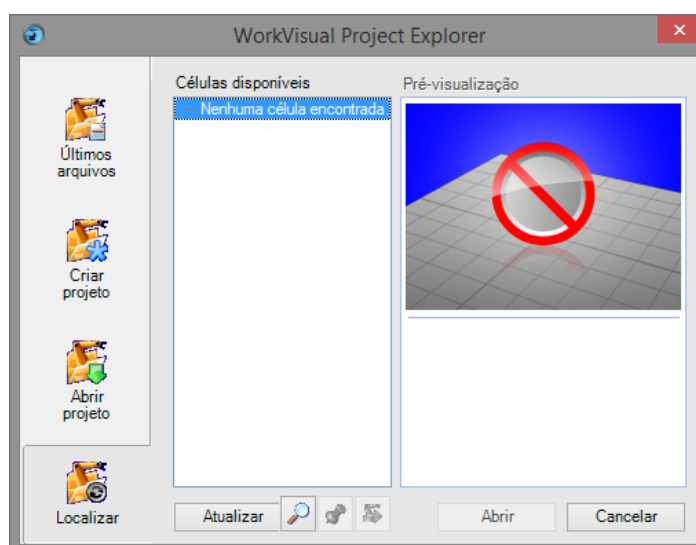


Figura 4.6 - Janela de seleção e criação de projetos "WorkVisual".

No arranque do *software* ou seleccionando “Abrir projeto”, surge a janela da Figura 4.6 para seleção do projeto. É possível criar um projeto novo ou abrir um projeto existente. Esta janela também permite fazer o *download* do projeto que se encontra na unidade de controlo. Para isso é necessário que a unidade de controlo se encontre na mesma rede que o computador e, ao seleccionar o separador “Localizar” iram aparecer todas as unidades de controlo que se encontram na mesma rede. Basta seleccionar a unidade pretendida e seleccionar “Abrir” para descarregar o projeto.

4.8 “SmartPad” KUKA

O “smartPAD” KUKA é uma consola ligada à unidade de controlo que permite configurar, controlar e programar o robô. Este tem um ecrã sensível ao toque, não sendo necessário um rato ou teclado externo. Na Figura 4.7 encontra-se uma ilustração da vista frontal de um “smartPAD”.

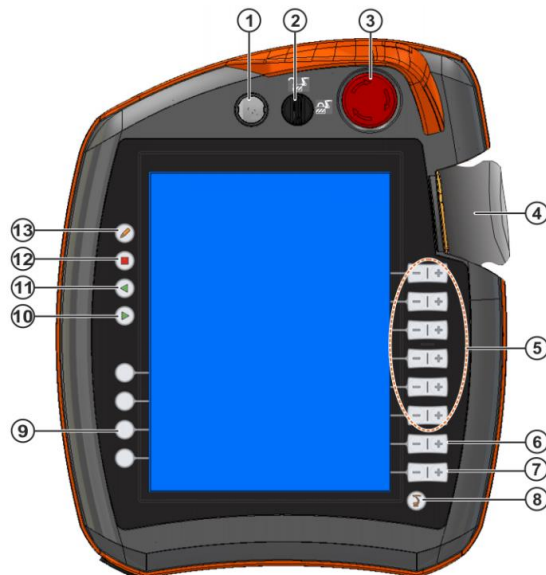


Figura 4.7 - Vista frontal do "smartPAD", adaptado de [23].

Os componentes numerados da Figura 4.7 são os seguintes:

1. Botão de desconexão do “smartPAD” da unidade de controlo;
2. Interruptor de chave para seleção do modo de operação do robô. Apenas pode ser utilizado com chave inserida;
3. Botão de emergência do robô industrial;
4. *Space Mouse*: sistema de controlo tridimensional do robô;
5. Teclas para movimentação manual do robô;
6. Teclas para seleção da velocidade do robô aquando da execução dum programa;
7. Teclas para seleção de velocidade do robô aquando da movimentação manual;
8. Tecla de menu: abre o menu no ecrã da consola;
9. Teclas de estado: são teclas configuráveis que estão associadas a pacotes de expansão da KUKA;
10. Tecla de início: é utilizada para iniciar um programa;
11. Tecla de início de reversão: é utilizada para correr o programa no sentido inverso;
12. Tecla de paragem: pára o programa a ser executado;
13. Tecla de teclado: faz aparecer um teclado no ecrã do “smartPAD” caso seja necessário.

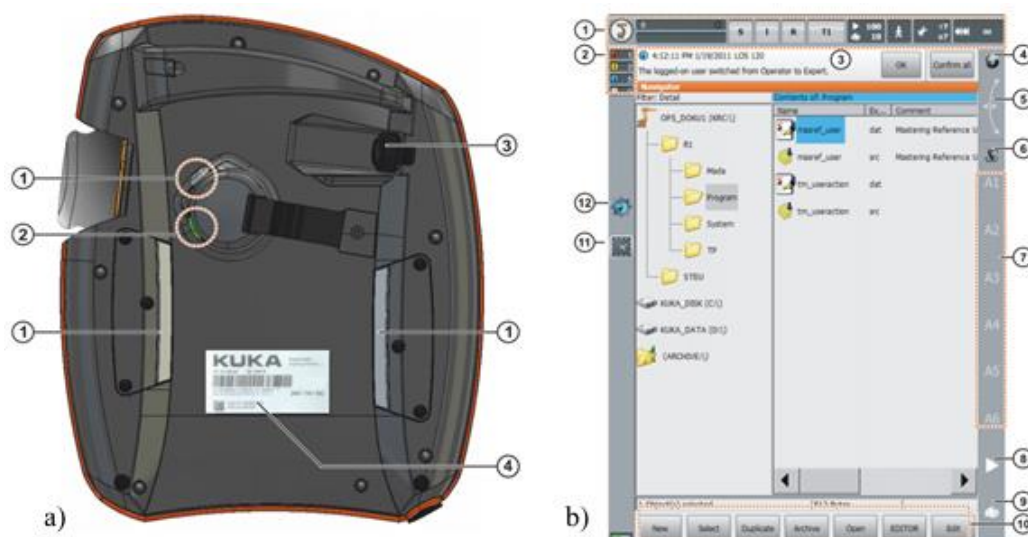


Figura 4.8 - "SmartPad": a) Vista traseira; b) *Interface* de utilizador; adaptado de [23].

A Figura 4.8 a) apresenta a vista traseira do “smartPad”, onde os elementos numerados são os seguintes:

1. Tecla de habilitação: também conhecida como “botão de homem-morto”, tem três posições sendo estas não pressionado, posição central e posição de pânico. Esta tecla tem que estar na posição central no modo T1 e T2 para a movimentação manual e para execução de programas. No modo automático e automático externo esta tecla não tem qualquer função;
2. Tecla de início: é utilizada para iniciar um programa;
3. Conector USB: é utilizado para transferir cópias de segurança e restaurar dados;
4. Placa de identificação.

Na Figura 4.8 b) encontra-se a *interface* gráfica de utilizador do “smartPad” constituída pelos seguintes elementos:

1. Barra de estados: mostra se SPS.SUB está a ser executado (S), acionamento dos motores (I), estado do programa atual (R), modo de operação (T1), velocidade de programa e manual, modo de execução do programa, ferramenta e base selecionada;
2. Contador de mensagens mostra as mensagens em espera e o seu tipo;
3. Janela de mensagens mostra a ultima mensagem recebida. Ao clicar nesta janela surge a lista de todas as mensagens em espera;
4. Indicador que mostra o sistema de coordenadas de movimentação do robô em que o *Space Mouse* está a trabalhar;
5. Indicador de alinhamento do *Space Mouse* em relação ao robô;
6. Indicador que mostra o sistema de coordenadas de movimentação do robô em que as teclas de movimentação estão a trabalhar;
7. Etiquetagem das teclas de movimentação em relação ao sistema de coordenadas utilizado;

8. Configuração da velocidade do robô ao executar o programa;
9. Configuração da velocidade do robô ao ser movimentado manualmente;
10. Barra de botões que mudam dinamicamente consoante a janela em que se encontram;
11. Relógio;
12. Ícone do *software WorkVisual* que abre o gestor de projetos.

4.9 Modos de operação do robô

Os robôs industriais KUKA têm quatro modos de funcionamento que apenas podem ser alterados através do interruptor de chave. Estes modos são os seguintes:

- T1 (Manual Velocidade Reduzida) é utilizado para teste, programação e aprendizagem. Neste modo a velocidade é limitada a 250 mm/s. Os programas novos ou modificados devem ser sempre executados primeiramente neste modo. Não é feita a monitorização da segurança de operador neste modo;
- T2 (Manual Velocidade Alta) é utilizado para testar programas à velocidade real, pelo que a velocidade executada é igual à velocidade programada. Neste modo não é possível movimentar o robô manualmente nem programar. A proteção de operador também não é monitorizada neste modo;
- AUT (Automático) é utilizada em robôs industriais sem comando superior. A velocidade do robô é igual à programada. Este modo apenas serve para executar os programas;
- AUT EXT (Automático Externo) é utilizado em robôs industriais com comando superior (PLC). A velocidade do robô é igual à programada e apenas serve para executar programas. O robô industrial é totalmente dependente do comando superior, sendo que este pode seleccionar o programa a executar, e ordenar a execução ou paragem deste.

4.10 Tipos de programação dos robôs KUKA

Existem dois tipos de programação nos robôs industriais KUKA: *inline forms* e *KRL syntax*.

O *inline forms*, apenas disponível na consola “smartPad”, é uma forma de programação simples para o utilizador. Neste tipo de programação é possível programar movimentos, impor condições lógicas e ler entradas e escrever saídas do robô.

A *KRL syntax* é uma forma de programação de mais alto nível normalmente utilizada em algoritmos mais complexos. Esta forma de programação pode ser feita na consola ou no *software WorkVisual*.

Na unidade de controlo KUKA, os programas são denominados módulos. Cada módulo é constituído por um ficheiro SRC e um ficheiro DAT, ambos com o nome do módulo. O ficheiro SRC contém o código do programa enquanto o ficheiro DAT contém dados permanentes e coordenadas de pontos.

Em ambos os tipos de programação é possível criar instruções de movimento do robô. Os movimentos possíveis de programar são os seguintes:

- PTP (*Point to Point*): movimento específico de eixo. Isto significa que o robô vai conduzir o TCP (*Tool Center Point* – ponto central da ferramenta) até o ponto de destino da forma mais rápida possível. Normalmente a trajetória mais rápida não é a mais curta, portanto, não é uma reta. A trajetória mais rápida vai ser aquela em que os eixos se movimentam o mínimo possível. Como este movimento não é previsível, deve ser testado antes para se ter a certeza que não ocorre nenhuma colisão;
- LIN (linear): movimento de trajetória em linha reta. O TCP é conduzido com velocidade constante e orientação definida desde o início até ao ponto de destino;
- CIRC (circular): movimento de trajetória circular que é definido pelo ponto de início, ponto auxiliar e ponto de destino. A velocidade do TCP é constante e a orientação é definida desde o início até ao fim;
- SPLINE: tipo de movimento especialmente adequado a trajetórias complexas em curva. Estas trajetórias também podem ser efetuadas com movimentos LIN e CIRC, porém o SPLINE torna-se mais simples e tem algumas vantagens em relação aos restantes.

4.11 Configuração inicial do robô

Ao ser adquirido um robô novo, ou quando é dada a este uma nova função, é necessário realizar a configuração de alguns parâmetros. A forma mais simples é utilizar o “*Start-up Wizard*”. Este guia é apresentado na consola do robô e leva o utilizador pelos diferentes passos de configuração. Caso o utilizador assim o entenda, pode saltar os passos apresentados. Todas estas configurações podem ser acedidas independentemente no HMI do robô. Assim, as configurações iniciais a efetuar são as seguintes:

- Dados da máquina;
- Opções de *hardware*;
- Calibração dos eixos;
- Calibração das ferramentas;
- Calibração das bases;
- Configuração das comunicações.

Depois de serem realizadas as configurações do “*Start-up Wizard*”, dependendo da aplicação, podem ser realizadas outras parametrizações.

4.11.1 Dados da máquina

Os dados da máquina são vários parâmetros do robô que vêm predefinidos de fábrica. Por norma estes encontram-se corretos, pelo que não necessitam de qualquer alteração. Estes podem ser confirmados comparando-os com os dados da placa de características do robô.

4.11.2 Opções de *hardware*

Existem três opções de *hardware* que podem ser alteradas no robô:

- *Interface* de utilizador;
- Sinal de entrada para controlo de periféricos;
- Reconhecimento de segurança de operador.

Todos estes parâmetros ficaram inalterados exceto o reconhecimento de segurança de operador. Esta opção encontra-se desabilitada por defeito. Caso seja habilitada, obriga a que em modo automático, quando uma porta é aberta e depois fechada, o operador tenha de pressionar um botão para confirmar que não se encontra ninguém na jaula do robô. Nesta situação, a opção foi habilitada.

4.11.3 Calibração dos eixos

A calibração dos eixos tem como função definir o zero de cada eixo do robô. Este procedimento pode ser efetuado utilizando um EMD (*Electronic Mastering Device*) ou um dispositivo analógico, podendo ambos os produtos ser adquiridos através do fabricante do robô. Usualmente, só há necessidade de calibração caso exista movimentação dos eixos quando este se encontra desligado. Neste caso, só será necessário a calibração, caso o robô se desajustasse durante o transporte. Quando o robô é desajustado, é possível visualizar um aviso na consola do mesmo, pelo que se torna impossível a sua operação enquanto este não for calibrado. Nesta situação, não foi necessário efetuar a calibração.

4.11.4 Calibração das ferramentas

A calibração das ferramentas do robô tem grande importância para o funcionamento correto do mesmo. Ao calibrar a ferramenta, o controlador do robô passa a ter em conta o peso, a inércia e o centro de gravidade desta, sendo que os cálculos de cinemática são efetuados com estes fatores em consideração. A calibração também define um sistema de eixos para a mesma, facilitando a operação e programação do robô. Existem vários métodos de calibração, sendo que o método XYZ de 4 pontos foi o selecionado para esta aplicação. Este método consiste em tocar com o ponto central da ferramenta, num ponto de referência, com quatro orientações diferentes. A partir destas posições o controlador consegue criar um eixo de coordenadas para a dada ferramenta.

4.11.5 Calibração das bases

A calibração das bases não é obrigatória. Por defeito, o robô já contém uma base denominada “WORLD”. Esta base estabelece um sistema de coordenadas cartesianas com origem na base do robô. As bases têm como objetivo criar um sistema de coordenadas para a área de trabalho do mesmo. Podem existir inúmeras bases no mesmo robô. Para calibrar uma base, o centro da ferramenta deve ser posicionado na origem da base, em seguida num ponto com o eixo X

positivo, e os restantes eixos a zero, e por fim um ponto em que X e Y sejam positivos e o eixo Z se encontre a zero. Este processo apenas funciona corretamente se a ferramenta utilizada estiver calibrada.

4.11.6 Configuração das comunicações

A janela que surge no “smartPad” para configuração das comunicações permite que sejam definidos os parâmetros de rede do robô, tais como o endereço IP, máscara de sub-rede e *gateway* predefinido.

4.12 Comunicação PROFINET

A máquina a desenvolver é controlada por um autómato SIEMENS. Assim, o robô será controlado pelo autómato, pelo que é necessário um meio de comunicação para o efeito. Esta comunicação será efetuada por PROFINET.

Assim sendo, neste protocolo é necessário um mestre (*MASTER*) e um escravo (*SLAVE*). Sendo o PLC o dispositivo que controla todos os restantes da máquina, este será o *MASTER* e o robô o *SLAVE*.

Para parametrizar o PROFINET no robô deve-se abrir o projeto do mesmo no *software WorkVisual* e seleccionar “PROFINET” na “Estrutura de Bus”, como é possível verificar na Figura 4.9.

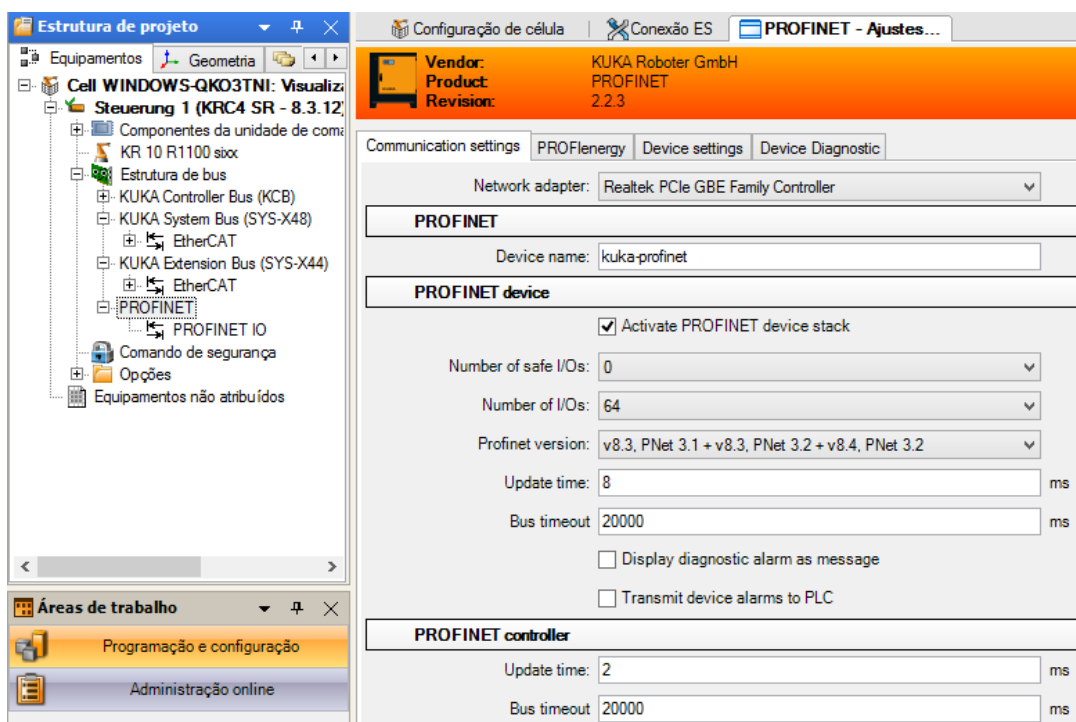


Figura 4.9 - Janela de configuração PROFINET do *software WorkVisual*.

4.13 Configuração de entradas e saídas

Existem diversos tipos de entradas e saídas num robô KUKA, como por exemplo PROFINET ou a *interface* X12 do controlador. O modelo do robô a aplicar é o AGILUS, que tem a particularidade de disponibilizar algumas *interfaces* na “Mão Central” do mesmo.

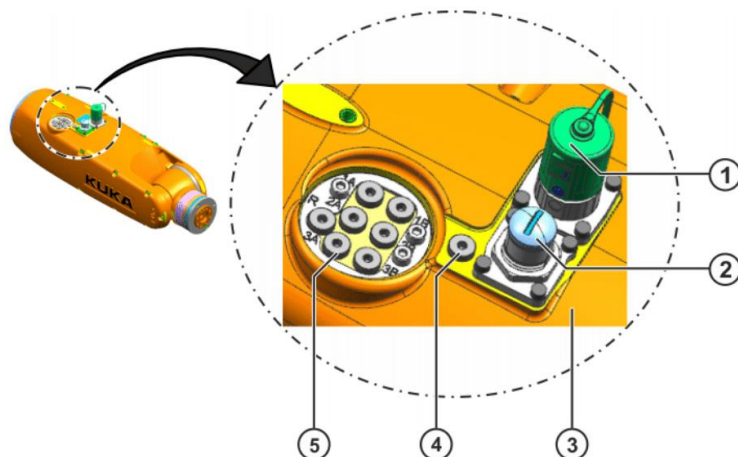


Figura 4.10 - Interfaces da "Mão Central" do robô KUKA Agilus, adaptado de [23].

Na Figura 4.10 é possível observar a “Mão Central” do robô, que contém as seguintes *interfaces*:

1. Conexão X41: contém 6 entradas e 2 saídas;
2. Conexão XPN41: tem 4 terminais ligados diretamente ao conector XPN1 que se encontra na base do robô. É recomendado para a passagem de uma ligação *Ethernet*;
3. “Mão Central”;
4. Tubo de ar AIR2: encontra-se ligado diretamente à entrada de ar AIR2 presente na base do robô;
5. Conexões de ar: são alimentadas pela entrada de ar AIR1 presente na base do robô. São controladas por saídas do robô que comandam electroválvulas internas.

Assim, foram utilizadas estas *interfaces* para controlo e monitorização da garra. Utilizou-se uma electroválvula para abertura e fecho da garra pneumática. Duas entradas do conector X41 serão ligadas a detetores da garra que permitem saber se esta se encontra aberta ou fechada.

4.14 Programação do robô

No robô utilizado existe um programa principal “MAIN.SRC”, onde se encontra o ciclo principal de comando. Na Figura 4.11 encontra-se um fluxograma do programa deste ficheiro. Este programa contém um ciclo *WHILE* que espera por um comando (CMD) vindo do PLC. Este comando é um número inteiro que decide, através de um *SWITH CASE*, qual a ação a ser realizada pelo robô. As ações possíveis a serem executadas pelo robô são as seguintes:

- *MAINTENANCE*: Deslocação do robô para a posição de manutenção. Esta posição facilita a realização de manutenção dentro da célula;

- *PRELOAD*: Deslocação do robô para a posição de pré-carga. Esta posição permite o robô de se aproximar da zona de carga sem interferir com o processo a decorrer;
- *GETP*: Realização de todos movimentos do robô para carregar o pacote da máquina. No final destes movimentos o robô regressa à posição inicial;
- *PUTP*: Realização de todos movimentos do robô para descarregar o pacote da máquina. No final destes movimentos o robô regressa à posição inicial;
- *PREUNLOAD*: Deslocação do robô para a posição de pré-descarga. Esta posição permite o robô de se aproximar da zona de descarga sem interferir com o processo a decorrer;
- *CALIB*: Deslocação do robô para a posição de calibração. Esta posição permite o ajuste da zona de carga, para que a recolha do pacote pelo robô seja bem sucedida.

Nas posições *MAINTENANCE*, *PRELOAD*, *PREUNLOAD* e *CALIB* existe uma proteção que impede a repetição dos movimentos, caso o robô já se encontre na posição desejada. Na posição *GETP* existe uma proteção que impede o robô de carregar caso este não se encontre na posição de pré-carga ou caso este já esteja carregado. Na posição *PUTP* existe uma proteção que impede o robô de descarregar caso este não se encontre na posição de pré-descarga ou caso este já esteja descarregado.

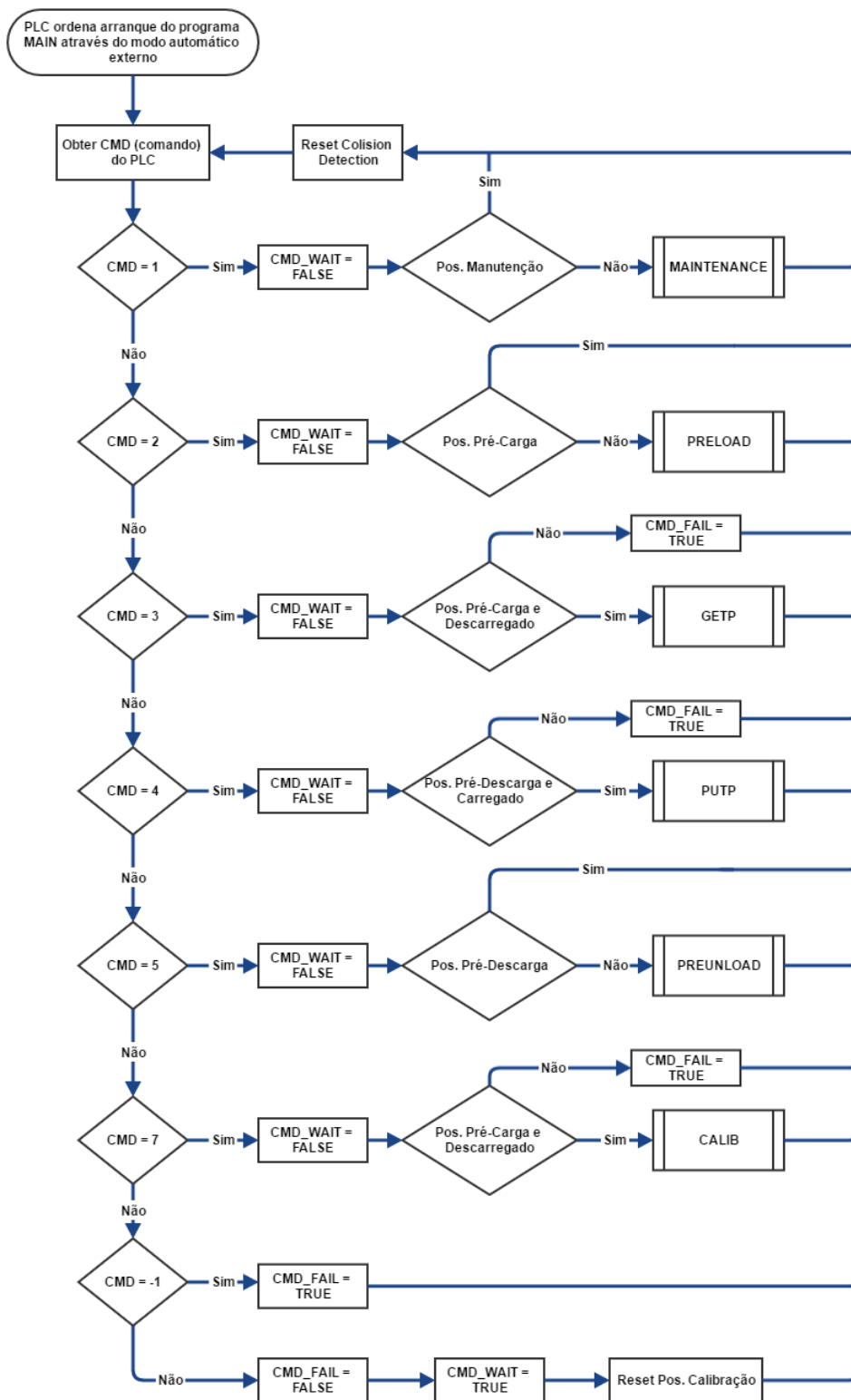


Figura 4.11 - Fluxograma do programa "MAIN.SRC".

Os robôs KUKA disponibilizam ainda acesso a um ficheiro “SPS.SUB” que é executado em *background* do sistema. Este ficheiro permite realizar inúmeras funções em paralelo com o programa principal, exceto executar movimentos. Na Figura 4.12 encontra-se o fluxograma do programa do ficheiro “SPS.SUB”.

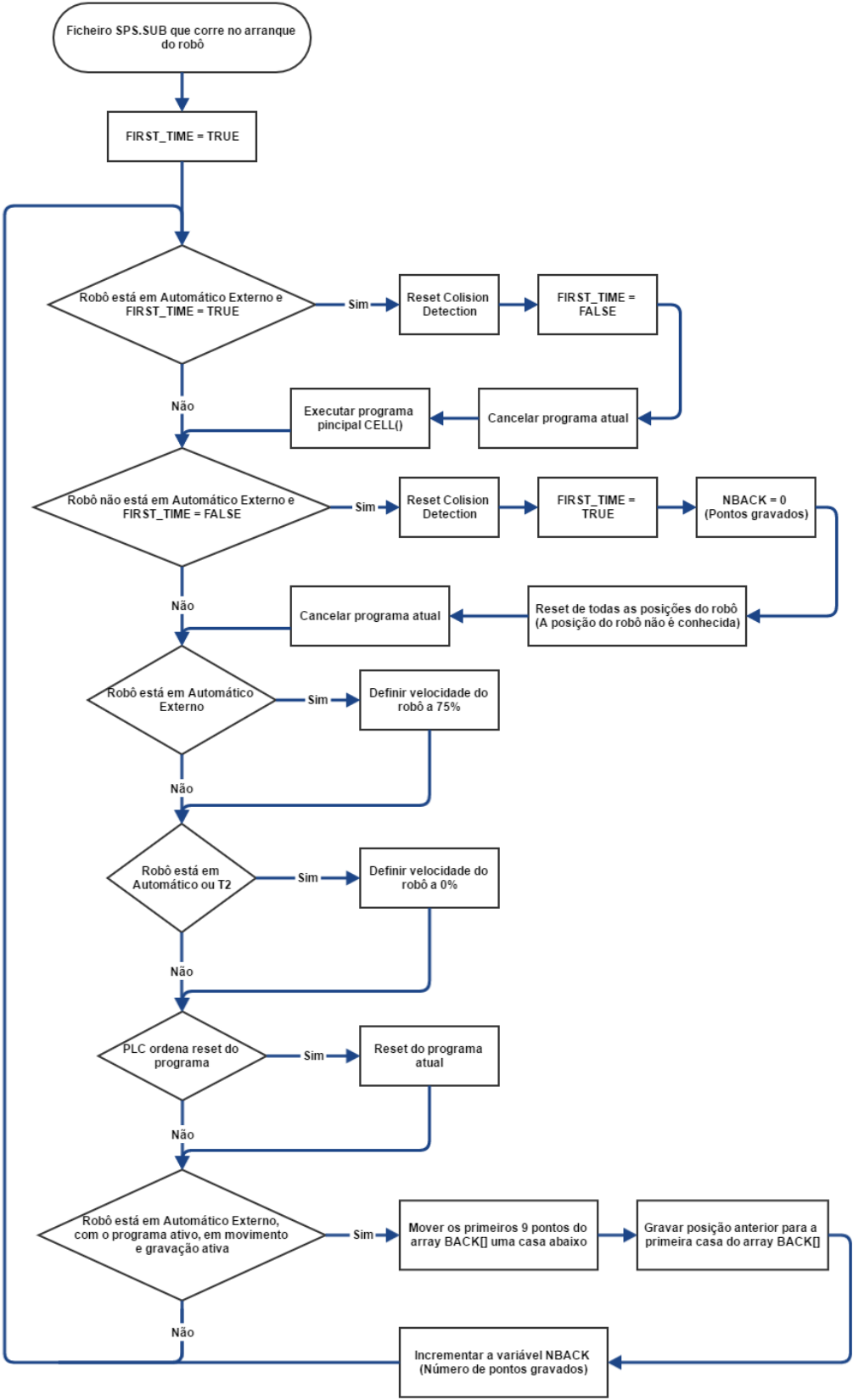


Figura 4.12 - Fluxograma do programa "SPS.SUB".

O programa apresentado na Figura 4.12 realiza as seguintes funções:

- Reinicia a deteção de colisão, cancela o programa atual e executa o programa principal quando o robô entra no modo Automático Externo;
- Reinicia a deteção de colisão, limpa os pontos gravados e cancela o programa atual quando o robô sai do modo Automático Externo;
- Define a velocidade do modo Automático Externo para 75%;
- Define a velocidade do modo Automático e T2 para 0%;
- Reinicia o programa caso seja ordenado pelo PLC;
- Guarda o último ponto executado numa FIFO (*First In First Out*) de pontos;

Existe ainda um programa que é executado quando ocorre uma colisão. Este programa executa os pontos gravados na FIFO de pontos até se encontrar numa posição segura.

4.15 Implementação da célula robotizada no cliente

No fim da programação e comissionamento do robô industrial, este foi implementado numa unidade industrial em Espanha. Na Figura 4.13 encontra-se a célula robotizada instalada. Por motivos de confidencialidade não é possível apresentar imagens com mais detalhe.

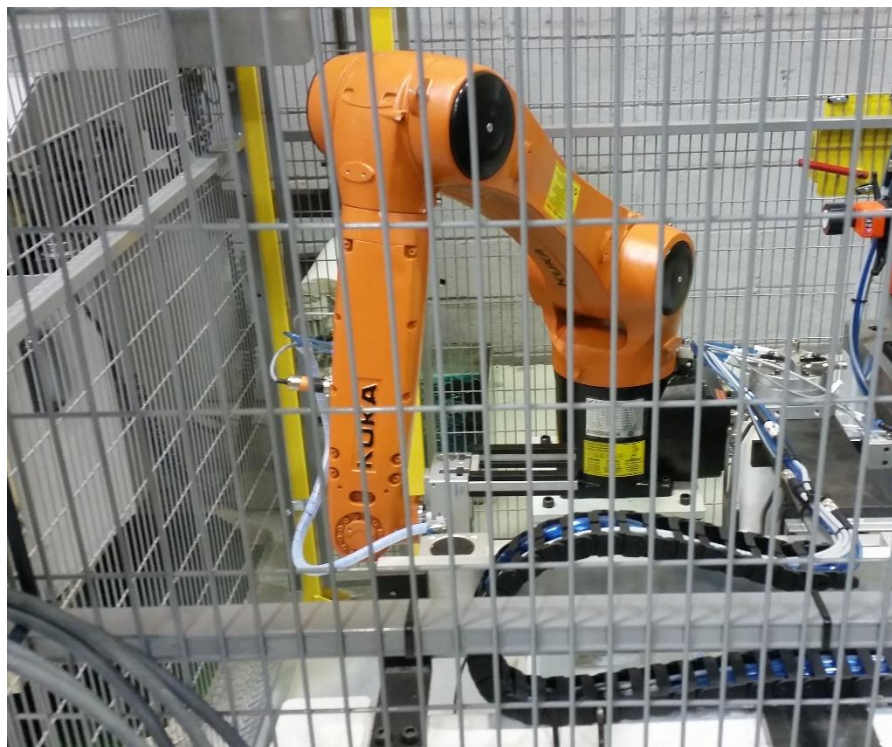


Figura 4.13 - Fotografia da célula robotizada instalada numa unidade industrial em Espanha.

Ao ser instalada a célula na unidade fabril foi necessário retirar todos os pontos novamente, de forma a que os movimentos realizados fossem bem sucedidos. Em seguida a máquina foi testada intensivamente para confirmar o seu bom funcionamento. A máquina encontra-se desde então em funcionamento em ambiente de produção, cumprindo todos os objetivos inicialmente definidos e com *feedback* muito positivo da parte do cliente.

5 Conclusões

Este capítulo apresenta as conclusões que se podem retirar dos projetos desenvolvidos no âmbito do estágio na empresa STREAK – Engenharia em Automação, Lda. São apresentadas ainda algumas considerações finais sobre o Estágio Curricular realizado.

5.1 Balastro eletrónico

O objetivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento de um sistema de variação de potência de lâmpadas ultravioleta para desinfeção de água. Essa variação tem o propósito de aplicar a radiação ultravioleta mínima necessária para o caudal de água a desinfetar, com a finalidade de maximizar a eficiência energética do sistema. A variação de potência também é usada para compensar o envelhecimento da lâmpada, permitindo emitir sempre a radiação ultravioleta necessária, mesmo que a potência aplicada tenha que ser maior que a nominal. Como a lâmpada usada possui características muito específicas, não foi possível encontrar um balastro com variação de potência que se adequasse às características da mesma. Deste modo, foi necessário desenvolver um balastro de raiz, incluindo estudo, projeto, simulação e teste, o que resultou numa tarefa complexa. Poderá ser necessário um conjunto de testes mais exaustivos para ajustar o protótipo final. Estes testes devem decorrer durante um período mais longo e obter o máximo de variáveis possíveis, principalmente aquelas que determinam a vida útil da lâmpada e a adequação da potência à aplicação.

Foi possível concluir o balastro de potência variável com sucesso e adquirir conhecimentos especializados na área da eletrónica de potência. Para balastros com *dimming*, o circuito integrado IRS2530D, da International Rectifier, representa uma aplicação simples e versátil. Com base em [10] é possível calcular os restantes componentes do circuito.

As lâmpadas fluorescentes possuem um comportamento bastante complexo e em geral, apenas através de um teste experimental, é possível aproximar as suas características específicas, que são necessárias para desenvolver circuitos eletrónicos de controlo que garantam o seu bom funcionamento.

5.2 Célula robotizada industrial

A programação e comissionamento da célula robotizada integrante da máquina foi bem sucedida. Devido à grande probabilidade de ocorrência de colisões, criou-se um sistema de reversão de movimento, que impede a paragem da máquina, evitando a necessidade de mover o robô manualmente.

Até à data, a máquina continua em pleno funcionamento na unidade industrial do cliente em Espanha. Assim, foi possível adquirir experiência na programação de robôs industriais e adquirir conhecimentos das regras de segurança que devem ser cumpridas na sua implementação e operação.

Este projeto representou a entrada da empresa em projetos de máquinas dedicadas para automação utilizando robótica industrial. O seu elevado sucesso gerou novas oportunidades para projetos nesta área e novas oportunidades de negócio.

5.3 Considerações finais

A empresa onde foi realizado o Estágio Curricular possui uma elevada experiência na criação de soluções na área de Automação Industrial e do Controlo de Processos, tendo-se revelado uma excelente escolha em termos das expectativas do estagiário. A maioria das soluções são produzidas de acordo com as necessidades do cliente, pelo que, para um estagiário, foi possível adquirir valiosos conhecimentos em diversas áreas da engenharia e da indústria, incluindo conhecimentos científicos, técnicos, de interação com clientes, incluindo desenvolvimento de trabalho em equipas multidisciplinares.

Referências bibliográficas

- [1] H2O Distributors. How Ultraviolet Purification Works. [Online]. www.h2odistributors.com/pages/info/how-ultraviolet-purification-works.asp
- [2] David Herring. (2001, September) Earth Observatory. [Online]. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/UVB/>
- [3] StudyElectrical. (2014, May) How Fluorescent Tube Lights Work. [Online]. <http://www.studyelectrical.com/2014/05/how-fluorescent-tube-lights-work.html>
- [4] El Blog de Bertus. (2019, diciembre) Luz UV. Nuevas Tecnologías de Conservación de Alimentos. [Online]. <http://www.esebertus.com/blog/2009/12/14/luz-uv-nuevas-tecnologias-de-conservacion-de-alimentos/>
- [5] Tom Harris. (2001, December) HowStuffWorks.com. How Fluorescent Lamps Work. [Online]. <http://home.howstuffworks.com/fluorescent-lamp4.htm>
- [6] NLPIP, "Non-dimming electronic ballasts for 4-foot and 8-foot fluorescent lamps," Lighting Research Center, New York, Specifier Reports Vol. 8, No. 1, 2000.
- [7] Seong-Rin Lim, Daniel Kang, Oladele Ogunseitan, and Julie Schoenung, "Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED) Bulbs," *Environmental Science & Technology*, December 2012.
- [8] Atlantic Ultraviolet Corporation. FreshWaterSystems.com. [Online]. <https://www.freshwatersystems.com/p-4496-mighty-pure-mp22a-6-gpm-ultraviolet-water-purifier.aspx>
- [9] PHILIPS Lighting. . [Online]. http://www.lighting.philips.com/main/prof/lamps/special-lamps/purificationwater-and-air/commercial-and-professional-air/tuv-t5/927972104099_EU/product
- [10] Muhammad H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, Third Edition ed., ch. 22, Ed.: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [11] Marco Soares. MSPC. [Online]. http://www.mspc.eng.br/elemag/ac_0620.shtml
- [12] Wikipédia. (2016, October) RLC Circuit. [Online]. https://en.wikipedia.org/wiki/RLC_circuit

- [13] Tom Ribarich. (2006, January) EE Times. [Online].
http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273066&page_number=1
- [14] M. Shvartsas and S. Glozman S. Ben-Yaakov, "Statics and Dynamics of Fluorescent Lamps Operating at High Frequency: Modeling and Simulation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. No 6, November/December 2002.
- [15] Thomas J. Ribarich and John J. Ribarich, "A New Procedure for High-Frequency Electronic Ballast Design," in *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, New Orleans, Louisiana, 1997.
- [16] IRS2530D Datasheet. (2008, July) Infineon. [Online].
<http://www.infineon.com/dgdl/irs2530d.pdf?fileId=5546d462533600a40153567af4f52821>
- [17] Andre Tjokrorahardjo. Infineon. [Online]. <http://www.infineon.com/dgdl/an-1153.pdf?fileId=5546d462533600a40153559a62e210fc>
- [18] IRS2158D Datasheet. (2009, September) Infineon. [Online].
<http://www.infineon.com/dgdl/irs2158d.pdf?fileId=5546d462533600a401535676a58e27ca>
- [19] L6574 Datasheet. (2003) STMicroelectronics. [Online].
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/group1/5b/32/c9/09/2c/07/43/fa/CD00001384/files/CD00001384.pdf/jcr:content/translations/en.CD00001384.pdf>
- [20] STMicroelectronics. (2007, January) Application Note AN2459. [Online].
http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/0f/6b/cd/48/e9/ab/41/13/CD00144693.pdf/files/CD00144693.pdf/jcr:content/translations/en.CD00144693.pdf
- [21] J.J. Ribarich T.J. Ribarich, "A New High-Frequency Fluorescent Lamp Model," in *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, St. Louis, Missouri, 1998.
- [22] Peter Green, "Ballast Design Software," in *PCIM Europe 02*, 101S Sepulveda Boulevard, El Segundo, CA, 90245-4382, 2002.
- [23] KUKA Robotics. (2014, January) KR C4 compact V4. BA_KR_C4_compact_pt.pdf.
- [24] How Products are Made. Industrial Robot. [Online].
<http://www.madehow.com/Volume-2/Industrial-Robot.html>

Anexos

Anexo I – *Datasheet* IRS2530D International Rectifier.

Anexo II – *Datasheet* Lâmpada PHILIPS - TUV 36T5 HO 4P SE UNP.

Anexo III – Exemplo dos ficheiros Excel com os valores instantâneos das correntes e tensões adquiridas no teste do protótipo.

Anexo I – Datasheet IRS2530D International Rectifier

International
IR Rectifier

July 09, 2008

IRS2530D(S)**DIM8™ DIMMING BALLAST CONTROL IC**

IC Features

- Dimming ballast control plus half-bridge driver
- Closed-loop lamp current dimming control
- Internal non-ZVS protection
- Internal crest factor protection
- Programmable preheat time
- Fixed dead-time (2.0 μ s typ.)
- Lamp insert auto-restart
- Internal bootstrap MOSFET
- Internal 15.6V zener clamp diode on Vcc
- Micropower startup (250 μ A)
- Latch immunity and ESD protection

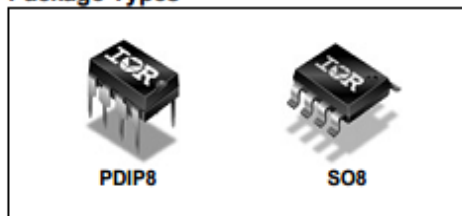
Ballast System Features

- Single chip dimming solution
- Simple lamp current dimming control method
- Single lamp current sensing resistor required
- No half-bridge current-sensing resistor required
- No external protection circuits required (fully internal)
- Flash-free lamp start at all dimming levels
- Large reduction in component count
- Easy to use for fast design cycle time
- Increased manufacturability and reliability

Product Summary

Topology	Half-Bridge
V _{OFFSET}	600 V
V _{OUT}	V _{CC}
I _{O+} & I _{O-} (typical)	180mA & 260mA
Deadtime (typical)	2.0 μ s

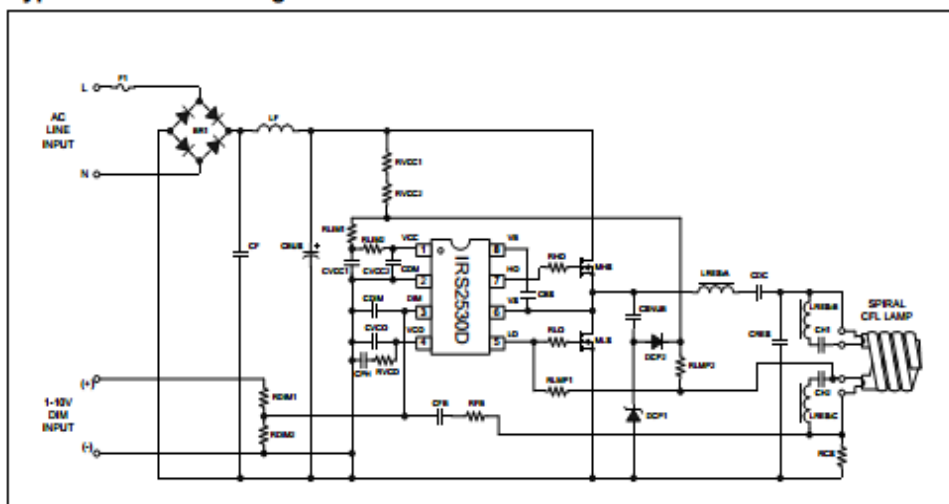
Package Types



Typical applications

- Linear dimming ballast (down to 10%)
- 3-way dimming ballast
- Multi-level switch dimming ballast

Typical Connection Diagram



Anexo II – Datasheet Lâmpada PHILIPS - TUV 36T5 HO 4P SE UNP



TUV T5

TUV 36T5 HO 4P SE UNP

TUV T5 lamps are single- or double-ended UVC (germicidal) lamps used in professional water and air disinfection units. The small 16 mm diameter of the lamp allows for a small system design and design flexibility. TUV T5 lamps offer constant UV output over their complete lifetime, for maximum security of disinfection and high system efficacy.

Product data

• General Characteristics

System Description	High Output
Cap-Base	4 Pins Single Ended
Cap-Base Information	4 Pins Single Ended
Bulb	T16
Main Application	Disinfection
Useful Life	9000 hr

• Light Technical Characteristics

Color Code	-
Color Designation (text)	-

• Electrical Characteristics

Lamp Wattage	75 W
Lamp Wattage Technical	75 W
Lamp Voltage	97 V
Lamp Current	0.8 A

• UV-related Characteristics

UV-C Radiation	25 W
----------------	------

• Product Dimensions

Reference Length A	845.4 (max) mm
Overall Length C	853 (max) mm
Diameter D	19.3 (max) mm

• Product Data

Order code	927972104099
Full product code	927972104099
Full product name	TUV 36T5 HO 4P SE UNP
Order product name	TUV 36T5 HO 4P SE UNP/32
Pieces per pack	1
Packing configuration	32
Packs per outerbox	32
Bar code on pack - EAN1	8711500869708
Bar code on outerbox - EAN3	8711500869715
Logistic code(s) - 12NC	927972104099
Net weight per piece	87.000 gr

PHILIPS

Anexo III – Exemplo dos ficheiros Excel com os valores instantâneos das correntes e tensões adquiridas no teste do protótipo

Frequência 40 kHz

Tempo (s)	V _{LAMP} (V)	V _{RCS} (V)	I _{TOTAL} (A)	V _{RFIL} (V)	I _{FIL} (A)	I _{LAMP} (A)
-5,000E-05	24,0	0,24	0,062	0,20	0,111	-0,050
-4,996E-05	24,0	0,32	0,082	0,46	0,256	-0,174
-4,992E-05	26,0	0,40	0,103	0,10	0,056	0,047
-4,988E-05	26,0	0,40	0,103	0,18	0,100	0,003
-4,984E-05	28,0	0,56	0,144	0,30	0,167	-0,023
-4,980E-05	28,0	0,48	0,123	0,42	0,233	-0,110
-4,976E-05	34,0	0,56	0,144	0,36	0,200	-0,056
-4,972E-05	30,0	0,56	0,144	0,42	0,233	-0,090
-4,968E-05	32,0	0,64	0,164	0,42	0,233	-0,069
-4,964E-05	32,0	0,72	0,185	0,48	0,267	-0,082
-4,960E-05	34,0	0,88	0,226	0,42	0,233	-0,008
-4,956E-05	34,0	0,88	0,226	0,50	0,278	-0,052
-4,952E-05	36,0	0,80	0,205	0,50	0,278	-0,073
-4,948E-05	36,0	0,96	0,246	0,50	0,278	-0,032
-4,944E-05	36,0	0,96	0,246	0,52	0,289	-0,043
-4,940E-05	38,0	0,96	0,246	0,52	0,289	-0,043
-4,936E-05	40,0	0,96	0,246	0,56	0,311	-0,065
-4,932E-05	40,0	1,12	0,287	0,58	0,322	-0,035
-4,928E-05	42,0	1,12	0,287	0,60	0,333	-0,046
-4,924E-05	42,0	1,20	0,308	0,56	0,311	-0,003
-4,920E-05	44,0	1,20	0,308	0,60	0,333	-0,026
-4,916E-05	44,0	1,20	0,308	0,60	0,333	-0,026
-4,912E-05	48,0	1,28	0,328	0,58	0,322	0,006
-4,908E-05	46,0	1,28	0,328	0,62	0,344	-0,016
-4,904E-05	46,0	1,36	0,349	0,60	0,333	0,015
-4,900E-05	50,0	1,44	0,369	0,66	0,367	0,003
-4,896E-05	50,0	1,52	0,390	0,64	0,356	0,034
-4,892E-05	52,0	1,44	0,369	0,66	0,367	0,003
-4,888E-05	52,0	1,60	0,410	0,64	0,356	0,055
-4,884E-05	52,0	1,68	0,431	0,66	0,367	0,064
-4,880E-05	54,0	1,60	0,410	0,70	0,389	0,021
-4,876E-05	56,0	1,68	0,431	0,70	0,389	0,042
-4,872E-05	56,0	1,60	0,410	0,68	0,378	0,032
-4,868E-05	58,0	1,76	0,451	0,68	0,378	0,074
-4,864E-05	58,0	1,84	0,472	0,68	0,378	0,094

-4,860E-05	60,0	1,84	0,472	0,68	0,378	0,094
-4,856E-05	60,0	1,92	0,492	0,70	0,389	0,103
-4,852E-05	62,0	1,84	0,472	0,68	0,378	0,094
-4,848E-05	62,0	1,92	0,492	0,70	0,389	0,103
-4,844E-05	66,0	2,08	0,533	0,72	0,400	0,133
-4,840E-05	66,0	2,08	0,533	0,70	0,389	0,144
-4,836E-05	66,0	2,16	0,554	0,70	0,389	0,165
-4,832E-05	68,0	2,00	0,513	0,74	0,411	0,102
-4,828E-05	68,0	2,16	0,554	0,72	0,400	0,154
-4,824E-05	70,0	2,08	0,533	0,70	0,389	0,144
-4,820E-05	68,0	2,24	0,574	0,70	0,389	0,185
-4,816E-05	72,0	2,16	0,554	0,70	0,389	0,165
-4,812E-05	70,0	2,32	0,595	0,70	0,389	0,206
-4,808E-05	74,0	2,40	0,615	0,68	0,378	0,238
-4,804E-05	72,0	2,48	0,636	0,72	0,400	0,236
-4,800E-05	74,0	2,40	0,615	0,68	0,378	0,238
-4,796E-05	74,0	2,48	0,636	0,68	0,378	0,258
-4,792E-05	74,0	2,40	0,615	0,70	0,389	0,226
-4,788E-05	76,0	2,48	0,636	0,66	0,367	0,269
-4,784E-05	76,0	2,64	0,677	0,66	0,367	0,310
-4,780E-05	80,0	2,48	0,636	0,68	0,378	0,258
-4,776E-05	76,0	2,64	0,677	0,68	0,378	0,299
-4,772E-05	78,0	2,64	0,677	0,66	0,367	0,310
-4,768E-05	78,0	2,56	0,656	0,66	0,367	0,290
-4,764E-05	82,0	2,64	0,677	0,64	0,356	0,321
-4,760E-05	82,0	2,72	0,697	0,62	0,344	0,353
-4,756E-05	78,0	2,88	0,738	0,62	0,344	0,394
-4,752E-05	80,0	2,80	0,718	0,66	0,367	0,351
-4,748E-05	82,0	2,88	0,738	0,62	0,344	0,394
-4,744E-05	82,0	2,88	0,738	0,62	0,344	0,394
-4,740E-05	84,0	2,88	0,738	0,60	0,333	0,405
-4,736E-05	84,0	2,72	0,697	0,58	0,322	0,375
-4,732E-05	86,0	2,96	0,759	0,60	0,333	0,426
-4,728E-05	84,0	3,04	0,779	0,62	0,344	0,435
-4,724E-05	88,0	2,96	0,759	0,60	0,333	0,426
-4,720E-05	86,0	2,96	0,759	0,64	0,356	0,403
-4,716E-05	86,0	2,96	0,759	0,60	0,333	0,426
-4,712E-05	90,0	3,20	0,821	0,58	0,322	0,498
-4,708E-05	86,0	3,20	0,821	0,56	0,311	0,509