

MARCELO LAMPKOWSKI

**DISPOSITIVO AUTOMATIZADO PARA A LIMPEZA DA SUPERFÍCIE
REFLETORA DE HELIOSTATO EM SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR
CONCENTRADA – CSP**

Botucatu

2017

MARCELO LAMPKOWSKI

**DISPOSITIVO AUTOMATIZADO PARA A LIMPEZA DA SUPERFÍCIE
REFLETORA DE HELIOSTATO EM SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR
CONCENTRADA – CSP**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura)

Orientador: Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim

Coorientador: Prof. Dr. Anselmo José Spadotto

Botucatu

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

L239d Lampkowski, Marcelo, 1982-
Dispositivo automatizado para a limpeza da superfície refletora de heliostato em sistemas de energia solar concentrada - CSP / Marcelo Lampkowski. - Botucatu : [s.n.], 2017
211 p. : il. color., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2017
Orientador: Odivaldo José Seraphim
Coorientador: Anselmo José Spadotto
Inclui bibliografia

1. Energia solar. 2. Fontes renováveis de energia. 3. Poeira - Controle. 4. Espelhos - Limpeza. I. Seraphim, Odivaldo José. II. Spadotto, Anselmo José. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

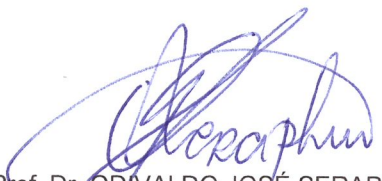
TÍTULO: “DISPOSITIVO AUTOMATIZADO PARA A LIMPEZA DA SUPERFÍCIE REFLETORA DE HELIOSTATO EM SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA-CSP.”

AUTOR: MARCELO LAMPKOWSKI

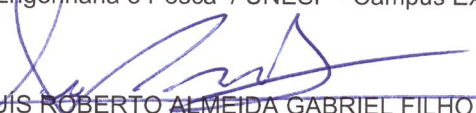
ORIENTADOR: ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM

COORIENTADOR: ANSELMO JOSE SPADOTTO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM
Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP


Prof. Dr. ÉRICO TADAO TERAMOTO
Depto. de Engenharia e Pesca / UNESP - Campus Experimental de Registro


Prof. Dr. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO
Coordenadoria do Curso de Administração / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP


Prof. Dr. RICARDO RALL
Depto de Informática / FATEC


Prof. Dr. MARIA CRISTINA RODRIGUES HALMEMAN
DABIC / UTFPR

Botucatu, 19 de maio de 2017.

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a todos aqueles indivíduos conscientes de que a evolução econômica e tecnológica é necessária, mas sempre respeitando e considerando as variáveis sociais e econômicas implícitas no processo. Para aqueles que ainda não têm essa consciência, que a adquiram urgentemente.

A todos aqueles que crêem na mudança de um modo de vida puramente consumista para a tomada de ações sustentáveis.

Aos que aceitam que nosso futuro depende do uso de fontes renováveis de energia.

Em especial, dedico este estudo a todos aqueles que acreditam no verdadeiro valor da pesquisa científica, ou seja, na pesquisa como uma via para a construção do conhecimento e como base para o progresso científico, tecnológico e cultural de uma nação.

Os resultados obtidos por meio de pesquisas científicas não são de propriedade do(s) autor(es), nem do(s) orientador(es) ou muito menos da instituição ou instituições onde a pesquisa foi desenvolvida. Não devem ser motivo de arrogância, egocentrismo ou poder. A pesquisa é feita para trazer benefícios à sociedade, ou seja, seu caráter é construtivo e contributivo. O conhecimento é para todos e de todos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por iluminar e guiar todos os meus passos e por me abençoar durante todos os anos dedicados à realização deste estudo. Sem a presença de Nosso Senhor, seria impossível a obtenção deste título. Afinal, se tudo posso Naquele que me fortalece, então nada é alcançado sem Deus em nossos corações.

Ao meu orientador, Prof. Odivaldo José Seraphim, e ao meu co-orientador, Prof. Anselmo José Spadotto, pelo profissionalismo demonstrado por ambos em todos os momentos.

A todos os professores e professoras os quais tive o prazer de adquirir conhecimentos, seja durante o período que cursei disciplinas ou em conversas informais.

Aos meus queridos pais, que me deram o dom da vida e que hoje celebram junto comigo a alegria de mais esta conquista.

À minha amada esposa, que me apoiou e me fortaleceu em todos os momentos. Sem seu amor e compreensão, não imagino como teria sido possível concluir este trabalho.

Ao meu sogro e à minha sogra, por todo auxílio oferecido durante o curso.

Aos assistentes de suporte acadêmico William Duarte Bailo e Ricardo Rabello de Arruda Filho, não só pelo auxílio durante a elaboração do trabalho, mas pelos laços de amizade formados e que, com certeza, serão sempre mantidos.

Aos pesquisadores e colegas com quem convivi durante o período que passei na Alemanha: Johannes Hertel, Andreas Pfahl, Prof. Dr. Joachim Götsche, Cristiano Teixeira Boura, Dra. Cinthya Larissa Guerrero Amezcua e Paul Mikuszies.

E a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A possibilidade de redução na oferta de combustíveis convencionais aliada ao crescimento da demanda por energia e a crescente preocupação com o meio ambiente impulsionam a pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam menor impacto ambiental. Dentre estas alternativas, destaca-se a energia solar, fonte disponível e passível de ser explorada a partir de todas as suas potencialidades. Atualmente, uma das vias tecnológicas de aproveitamento da fonte solar para geração de energia é a heliotermia, também conhecida como energia solar concentrada ou *Concentrated Solar Power* (CSP), baseada na utilização de superfícies espelhadas que refletem e concentram a radiação solar direta com o objetivo de convertê-la em energia térmica, a partir da qual se gera vapor d'água que irá acionar um ciclo termodinâmico reversível que converte calor em trabalho, conhecido como Rankine. O *soiling* consiste no depósito de diferentes tipos de sujeiras em uma superfície exposta em um dado ambiente. No caso de usinas CSP de torre central, o acúmulo gradativo de poeira, sujeira ou até mesmo de excremento de pássaros nas superfícies refletoras dos heliostatos causa uma redução significativa na quantidade de radiação solar que atinge o receptor posicionado no alto da torre e diminuição da eficiência de todo o sistema. Assim, faz-se necessário manter um alto fator de refletividade nas superfícies espelhadas dos heliostatos por meio de uma limpeza regular. Este trabalho apresenta a proposta de um mecanismo automatizado para efetuar a limpeza de superfícies refletoras de heliostatos. O desenvolvimento deste dispositivo, desde sua concepção, passando pelas fases de construção, instalação e funcionamento, respeita padrões de eficiência da limpeza, visa o baixo custo de produção, facilidade de instalação e minimização dos impactos ambientais pertinentes, como, por exemplo, baixo consumo de água na operação. Por meio de experimentos realizados em situações reais de aplicação, utilizando para tal um heliostato de 8 m² localizado no Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, campus de Botucatu, constatou-se que o dispositivo proposto é uma opção operacionalmente e economicamente viável de solução ao *soiling* quando aplicado na região de Botucatu, principalmente se comparado a outras propostas de métodos de limpeza de heliostatos apresentadas nos cenários internacional e nacional. Além disso, por meio de estudos sobre os impactos ambientais de usinas heliotérmicas, foi possível sugerir melhorias no processo de licenciamento ambiental de usinas CSP no Brasil.

Palavras-chave: energia heliotérmica, espelhos, sujidade.

ABSTRACT

The possibility of reduction in the supply of conventional fuels, the continuous growing demand for energy and the current concern with the environmental scenario influence the development of researches regarding alternative, renewable and less polluting energy sources, which produces less environmental impact. Among these alternatives, it is worth mentioning the solar energy, available source and that can be explored from all its potentialities. Nowadays, one of many the technological process that uses solar energy for electricity generation is the solar thermal one, also known as Concentrated Solar Power (CSP), based on the use of mirrored surfaces that reflect and concentrate the direct sunlight in order to convert it into thermal energy, from which it generates water vapor that will initiate a reversible thermodynamic cycle which converts heat into energy (Rankine cycle). The phenomenon known as soiling consists in the depositing of different types of dirt on a surface exposed in a given environment. In the case of power tower CSP plants, the gradual accumulation of dust, dirt or even bird's excrements on the reflective surfaces of heliostats causes a significant reduction in the amount of solar radiation that reaches the receiver located at the top of the tower and decreases the efficiency of the entire system. Thus, it is necessary to maintain a high reflectivity factor in the mirrored surfaces of the heliostats through a regular cleaning. This work presents a proposal of an automated mechanism to clean up the reflective surfaces of heliostats. The development of this device, from its conception, through the stages of construction, installation and operation, regarding the cleaning efficiency standards, aimed at low production cost, ease of installation and minimizing the relevant environmental impacts, such as, low consumption of water during its operation. Through experiments in real situations, using a 8 m² heliostat located in the Department of Rural Engineering of UNESP's Faculty of Agronomic Sciences, Botucatu campus, it was verified that the proposed device is an operationally and economically option for the solution to soiling when applied at Botucatu's region, especially if compared to other proposed methods of heliostats cleaning presented in the international and national scenarios. In addition, through studies on the environmental impacts of heliothermic plants, it was possible to suggest improvements in the environmental licensing process of CSP plants in Brazil.

Keywords: heliothermic energy, mirrors, soiling.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Plantas CSP de cilindros parabólicos - SEGS (<i>Solar Electric Generating Systems</i>).....	47
Tabela 2 -	Usinas CSP de torre central em operação.....	60
Tabela 3 -	Usinas CSP de torre central em fase de construção.....	62
Tabela 4 -	Características das plantas-piloto CSP de torre central.....	82
Tabela 5 -	Listagem de materiais elétricos e eletrônicos necessários para a construção do dispositivo de limpeza de heliostatos.....	85
Tabela 6 -	Listagem de materiais necessários para a construção da estrutura mecânica do dispositivo de limpeza de heliostatos.....	88
Tabela 7 -	Dados pluviométricos da cidade de Botucatu-SP.....	92
Tabela 8 -	Código-fonte - programação do sistema.....	118
Tabela 9 -	Comandos de interação entre usuário e mecanismo de limpeza de heliostatos.....	128
Tabela 10 -	Comparação entre os dados pluviométricos da estação meteorológica e ciclos de limpeza (jan/2017).....	143
Tabela 11 -	Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 25/01/2017.....	144
Tabela 12	Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 27/01/2017.....	144
Tabela 13 -	Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 30/01/2017.....	145
Tabela 14 -	Comparação entre os dados pluviométricos da estação meteorológica e ciclos de limpeza (fev/2017).....	148
Tabela 15 -	Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 02/02/2017.....	149
Tabela 16 -	Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 17/02/2017.....	152
Tabela 17 -	Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos	

	de limpeza em 25/02/2017.....	153
Tabela 18 -	Comparação entre os dados pluviométricos da estação meteorológica e ciclos de limpeza (mar/2017).....	154
Tabela 19 -	Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 02/03/2017.....	156
Tabela 20 -	Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 03/03/2017.....	156
Tabela 21 -	Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 10/03/2017.....	158
Tabela 22 -	Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 18/03/2017.....	161
Tabela 23 -	Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 19/03/2017.....	161
Tabela 24 -	Dimensões da escavadeira adaptada para limpezas de painéis fotovoltaicos.....	166
Tabela 25 -	Custos da estrutura mecânica.....	167
Tabela 26 -	Custos dos componentes elétricos e eletrônicos.....	167
Tabela 27 -	Custos dos componentes elétricos e eletrônicos considerando valores no atacado.....	169
Tabela 28 -	Custos do consumo de diesel pela escavadeira.....	172
Tabela 29 -	Atividades ou empreendimentos sujeitos ao licenciamento ambiental.....	190

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta de energia no Brasil.....	34
Figura 2 - Percentuais de geração de eletricidade de acordo com os empreendimentos em operação no Brasil.....	35
Figura 3 - Mapa mundial de radiação solar global.....	36
Figura 4 - Possibilidade de aproveitamento da energia solar.....	37
Figura 5 - Média de incidência de radiação solar direta no Brasil.....	40
Figura 6 - Quatro possíveis configurações de usinas termossolares.....	44
Figura 7 - Concentração da radiação em uma calha parabólica	45
Figura 8 - Funcionamento de uma usina CSP baseada em cilindros parabólicos.....	46
Figura 9 - Esquema simplificado de uma central de RLF.....	49
Figura 10 - Usinas RLF de Liège (Bélgica), Almería (Espanha) e Bakersfield (EUA).....	52
Figura 11 - Esquema de operação de um disco parabólico.....	54
Figura 12 - Discos parabólicos da central heliotérmica Maricopa Solar, no Arizona, EUA.....	55
Figura 13 - Esquema de funcionamento de um sistema baseado em torre solar central.....	57
Figura 14 - Complexo de usinas CSP de torre central localizado em Ivanpah, EUA.....	61
Figura 15 - Diferentes dimensões de heliostatos (modelo de 8m ² e modelo de 120 m ²).....	64
Figura 16 - Um heliostato e seus componentes.....	65
Figura 17 - Exemplo de formação de uma faceta-sanduíche.....	67
Figura 18 - Heliostato do tipo "T", com eixo de orientação azimute-elevação.....	68
Figura 19 - Heliostato com duas unidades lineares e movimentação no eixo horizontal primário.....	70
Figura 20 - Heliostato com sistema de movimentação em arcos.....	71
Figura 21 - Natureza microscópica da sujeira.....	75

Figura 22 - Limpeza de calhas parabólicas das usinas SEGs.....	76
Figura 23 - Limpeza de heliostato usando caminhão e água pressurizada na usina Gemasolar.....	77
Figura 24 - Método para limpeza de heliostato proposto por Zhang et al. (2007).....	78
Figura 25 - HECTOR realizando a limpeza da superfície espelhada de um heliostato na PSA, Espanha.....	79
Figura 26 - PARIS - Sistema autônomo de limpeza de calhas parabólicas.....	80
Figura 27 - Sistema de limpeza de heliostato - rodo movido pela gravidade.....	81
Figura 28 - Fluxograma - Macroprocesso representando o funcionamento do dispositivo de limpeza.....	94
Figura 29 - Fluxograma - subprocesso do acionamento do mecanismo de limpeza.....	95
Figura 30 - Rolo de limpeza protegido por chapa galvanizada dobrada.....	98
Figura 31 - Fixação do mecanismo de limpeza no heliostato.....	99
Figura 32 - Laterais do heliostato - pontos de fixação e barras chatas dobradas em formato "U".....	100
Figura 33 - Sistema de transmissão por eixo e posição dos motores componentes do sistema.....	102
Figura 34 - Trolleys componentes do mecanismo de limpeza.....	103
Figura 35 - Trolley localizado no lado direito do heliostato.....	104
Figura 36 - Trolley localizado no lado esquerdo do heliostato.....	104
Figura 37 - Parte inferior do mecanismo e roldanas de apoio.....	105
Figura 38 - Forma de conexão dos cabos de aço.....	106
Figura 39 - Posicionamento dos sensores indutivos.....	107
Figura 40 - Escova de limpeza dividida em três partes.....	108
Figura 41 - Adaptação dos sensores indutivos.....	109
Figura 42 - Circuito motriz do dispositivo de limpeza dos espelhos componentes do heliostato.....	110
Figura 43 - Circuito de comando dos motores.....	111

Figura 44 - Portas de entrada e saída do Arduino.....	113
Figura 45 - Diagramas elétricos dos sensores e atuadores.....	114
Figura 46 - Funcionamento dos sensores indutivos.....	116
Figura 47 - Leituras do sensor com informações sobre a inexistência de chuva.....	127
Figura 48 - Acionamento do mecanismo programado pelo usuário.....	129
Figura 49 - Detecção de nível de chuva aceitável para acionamento do mecanismo.....	130
Figura 50 - Ativação da gravação de dados em arquivo CSV.....	131
Figura 51 - Funcionamento do sistema por meio do aplicativo BlueTerm.....	133
Figura 52 - Exemplo de conteúdo de arquivo CSV no Microsoft Excel.....	135
Figura 53 - Exemplo de resultados após a aplicação de filtro no arquivo CSV.....	136
Figura 54 - Presença de manchas nas superfícies espelhadas (novembro/2016).....	138
Figura 55 - Sujidade no quarto espelho componente do heliostato (novembro/2016).....	139
Figura 56 - Sujidade no sexto espelho componente do heliostato (novembro/2016).....	140
Figura 57 - Sujidade das áreas limpas em relação aos demais espelhos do heliostato (novembro/2016).....	141
Figura 58 - Índices pluviométricos diários referentes ao mês de janeiro de 2017.....	142
Figura 59 - Situação dos espelhos após ciclos de limpeza realizados em 25/01/2017.....	146
Figura 60 - Índices pluviométricos diários referentes ao mês de fevereiro de 2017.....	147
Figura 61 - Situação da sujidade nos espelhos registrada em 06/02/2017.....	150
Figura 62 - Situação da sujidade nos espelhos registrada em 16/02/2017.....	151

Figura 63 - Situação da sujidade nos espelhos registrada em 23/02/2017.....	152
Figura 64 - Índices pluviométricos diários referentes ao mês de março de 2017.....	154
Figura 65 - Situação da sujidade nos espelhos registrada em 09/03/2017.....	158
Figura 66 - Situação da sujidade nos espelhos registrada em 16/03/2017 (período da manhã).....	159
Figura 67 - Situação da sujidade nos espelhos registrada no dia 16/03/2017, durante e após o corte da grama.....	160
Figura 68 - Mecanismo de limpeza e movimentação do heliostato em diferentes inclinações nos eixos X e Y.....	162
Figura 69 - Escavadeira adaptada para limpeza de painéis fotovoltaicos.....	165
Figura 70 - Quatro tipos de usinas CSP.....	183
Figura 71 - Média de incidência de radiação solar direta no Brasil.....	184

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	21
CAPÍTULO 1 - DISPOSITIVO AUTOMATIZADO PARA A LIMPEZA DA SUPERFÍCIE REFLETORA DE HELIOSTATO EM SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA – CSP.....	25
1.1 INTRODUÇÃO.....	27
1.2 REVISÃO DE LITERATURA.....	32
1.2.1 O cenário energético brasileiro e a energia solar.....	32
1.2.2 Energia solar concentrada e as configurações de usinas existentes....	41
1.2.2.1 <i>Cilindros parabólicos (parabolic trough)</i>	45
1.2.2.2 <i>Refletor Linear Fresnel (RLF)</i>	49
1.2.2.3 <i>Discos parabólicos (dish-stirling)</i>	53
1.2.2.4 <i>Torre solar</i>	56
1.2.3 Heliostato.....	63
1.2.4 <i>Soiling</i> (acúmulo de sujeira em superfícies espelhadas) e métodos de limpeza.....	73
1.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	84
1.3.1 Materiais.....	84
1.3.2 Métodos.....	91
1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	96
1.4.1 Estrutura mecânica do dispositivo de limpeza de espelhos em heliostatos.....	98
1.4.1.1 <i>Necessidade de adaptação na estrutura mecânica</i>	108
1.4.2 Diagramas elétricos do dispositivo de limpeza de espelhos em heliostatos.....	109
1.4.3 Programação (algoritmo) e operação do sistema.....	116
1.4.4 Avaliação do funcionamento do dispositivo por meio de situações reais.....	137
1.4.5 Custos do projeto.....	164
1.5 REFERÊNCIAS.....	173
CAPÍTULO 2 - O PROCESSO DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE USINAS HELIOTÉRMICAS (CONCENTRATED SOLAR POWER	

	- CSP)	179
2.1	INTRODUÇÃO.....	181
2.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	187
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	197
2.4	REFERÊNCIAS.....	203
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	205
	REFERÊNCIAS	210
	APÊNDICE 1	211

INTRODUÇÃO GERAL

Fatores como o desenvolvimento econômico, a constante inserção de novas tecnologias no cotidiano dos indivíduos e as mudanças nos hábitos da população influenciaram o aumento no consumo de energia no Brasil e no mundo. Ao mesmo tempo, as fontes fósseis de energia (carvão mineral, gás natural e petróleo) estão se esgotando e existe uma crescente preocupação global com o meio ambiente. Neste cenário, torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas que objetivem encontrar formas de gerar energia de maneira sustentável, ou seja, respondendo à crescente demanda e cogitando o uso de fontes energéticas mais limpas e renováveis.

Considerando que o desafio atual está voltado à geração de energia com baixo impacto ambiental e, ao mesmo tempo, que suporte o crescimento socioeconômico das nações, o recurso solar merece destaque. Denomina-se energia solar àquela proveniente da obtenção direta de energia do Sol, seja por aproveitamento do calor gerado pela sua radiação (energia térmica) usada em aquecimentos de fluidos ou ambientes na geração de potência mecânica ou elétrica, ou ainda, convertendo-a diretamente em energia elétrica por meio de materiais chamados de termoeletrônicos e/ou fotovoltaicos. A energia obtida por meio de fonte solar é limpa, ou seja, não produz qualquer tipo de poluente, renovável e, portanto, sustentável.

A capacidade de geração de energia elétrica brasileira totalizou 143,6 GW de potência instalada em maio de 2016, referente aos 4.521 empreendimentos em operação, de acordo com informações do Banco de Informação da Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Existe uma previsão para os próximos anos de uma adição de 27.362.507 kW na capacidade de geração de eletricidade do país, proveniente de 209 empreendimentos em construção e mais 626 outorgados (ANEEL, 2016).

Em virtude dos fatores geográficos, as hidrelétricas representam atualmente o mais importante recurso para a produção de energia elétrica do país: sua participação na matriz energética brasileira é de cerca de 61%. Já a capacidade instalada de energia proveniente do recurso solar no Brasil representa menos de 1% da matriz energética (ANEEL, 2016). O incentivo à energia solar no país justifica-se

pela abundante disponibilidade de radiação solar em todo seu território, principalmente em grandes áreas das regiões Nordeste, Centro-Oeste e parte da região Sudeste.

Tecnologias baseadas em energia solar concentrada (*Concentrated Solar Power* - CSP), também chamadas de solar-térmica ou heliotérmica, utilizam sistemas de concentração da radiação solar para obtenção de quantidades significativas de fluido a altas temperaturas para aplicação em ciclos térmicos de potência.

A geração elétrica heliotérmica acontece de forma indireta: antes de virar energia elétrica, o calor do sol é captado e armazenado para, depois, ser transformado em energia mecânica e, por fim, em eletricidade. O calor recolhido aquece um líquido que passa pelo receptor, chamado de fluido térmico. Esse líquido armazena o calor e serve para aquecer a água dentro da usina e gerar vapor. A partir daí, a usina heliotérmica segue os mesmos processos de uma usina termoelétrica: o vapor gerado movimenta uma turbina e aciona um gerador, produzindo, assim, energia elétrica (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2015).

Para que o processo de uso e acúmulo do calor proveniente da radiação solar ocorra, espelhos são usados para refletir a luz solar e concentrá-la num único ponto, onde há um receptor. Essa é a principal ideia da tecnologia CSP baseada em torre solar.

Usinas termossolares que utilizam a tecnologia de torre central consistem de um campo de heliostatos que se movem independentemente e de um concentrador localizado no topo de uma torre. Heliostatos são dispositivos que seguem o movimento do Sol e que utilizam habitualmente um espelho ou conjunto de espelhos que podem ser orientados ao longo do dia através de um eixo fixo de modo a redirecionar a luz solar para um receptor estacionário. O concentrador consiste de um feixe tubular por onde circula um fluido térmico, que é aquecido pela insolação refletida. Opcionalmente, estas centrais podem ter um sistema de armazenamento térmico para os períodos em que não há radiação solar disponível (EUSTÁQUIO, 2011).

Esta tese está dividida em dois capítulos. O primeiro apresenta uma proposta de solução ao fenômeno conhecido como *soiling* (ou sujidade, termo equivalente na

língua portuguesa), que consiste no depósito de diferentes tipos de sujeiras em uma superfície exposta em um dado ambiente. Em sistemas CSP de torre central, a quantidade de poeira e demais sujeiras que se acumulam nas superfícies espelhadas dos heliostatos reduzem o fator de refletividade das mesmas, além de diminuir a quantidade de radiação solar que atinge o receptor posicionado no alto da torre e, conseqüentemente, limitar a energia gerada pela usina. Assim, uma limpeza regular das superfícies espelhadas faz-se primordial para a manutenção dos níveis de produtividade desejados. Portanto, o primeiro capítulo tem como objetivo demonstrar o desenvolvimento de um dispositivo automatizado para efetuar a limpeza de superfícies refletoras de heliostatos em usinas CSP baseadas em tecnologia de torre central. O desenvolvimento deste dispositivo, contemplou as fases de concepção, construção, instalação e funcionamento, respeitando padrões de eficiência da limpeza, visando o baixo custo de produção e instalação e a minimização dos impactos ambientais pertinentes, como, por exemplo, baixo consumo de água na operação. Já o segundo capítulo se propõe a apresentar os principais aspectos da legislação existente em relação à impactos ambientais e processos para a obtenção das licenças ambientais e, por seguinte, desenvolver propostas para o estabelecimento de diretrizes de licenciamento ambiental que se adaptem aos empreendimentos que fazem uso de tecnologias CSP.

Destaca-se que a utilização da tecnologia CSP no setor agroindustrial insere-se no caso particular das aplicações da energia solar na indústria, porém é larga a gama de aplicações específicas em face dos últimos desenvolvimentos no campo da produção dos chamados combustíveis solares, como, por exemplo, o gás de síntese, hidrocarbonetos leves, bio-óleos ou carvão vegetal. Exemplos de aplicação da tecnologia CSP na agroindústria são diversos: o calor gerado pelos sistemas pode, por exemplo, ser utilizado por uma fábrica de laticínios no processo de pasteurização do leite. Este processo é indispensável e obrigatório na produção de leite e utiliza o calor para destruir completamente a flora microbiana patogênica. Outro exemplo de aplicação do calor gerado por sistemas CSP no agronegócio é em relação aos processos de limpeza e esterilização de equipamentos utilizados em frigoríficos. A energia gerada no processo de conversão termoelétrica seria utilizada para suprir as necessidades destas instalações mencionadas.

Este trabalho baseou-se na ideia da aplicação eficiente de energia no meio rural e do estímulo ao uso de fontes alternativas renováveis, sem prejuízo de qualidade e de produtividade, bem como a diminuição de custos do produto final e a evolução tecnológica na agroindústria.

Pretende-se, assim, que este estudo também seja voltado ao uso de centrais de energia solar de alta temperatura (CSP) com a integração e sustentabilidade na agroindústria, através da energização rural e a sua inclusão na estrutura da matriz energética brasileira.

Espera-se que os resultados apresentados no final do trabalho contribuam para o avanço do conhecimento sobre o tema.

CAPÍTULO 1

DISPOSITIVO AUTOMATIZADO PARA A LIMPEZA DA SUPERFÍCIE REFLETORA DE HELIOSTATO EM SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA – CSP

RESUMO

A possibilidade de redução na oferta de combustíveis convencionais aliada ao crescimento da demanda por energia e a crescente preocupação com o meio ambiente impulsionam a pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam menor impacto ambiental. Dentre estas alternativas, destaca-se a energia solar, fonte disponível e passível de ser explorada a partir de todas as suas potencialidades. Atualmente, uma das vias tecnológicas de aproveitamento da fonte solar para geração de energia é a heliotermia, também conhecida como energia solar concentrada ou *Concentrated Solar Power* (CSP), baseada na utilização de superfícies espelhadas que refletem e concentram a radiação solar direta com o objetivo de convertê-la em energia térmica, a partir da qual se gera vapor d'água que irá acionar um ciclo termodinâmico reversível que converte calor em trabalho, conhecido como Rankine. O *soiling* consiste no depósito de diferentes tipos de sujeiras em uma superfície exposta em um dado ambiente. No caso de usinas CSP de torre central, o acúmulo gradativo de poeira, sujeira ou até mesmo de excremento de pássaros nas superfícies refletoras dos heliostatos causa uma redução significativa na quantidade de radiação solar que atinge o receptor posicionado no alto da torre e diminuição da eficiência de todo o sistema. Assim, faz-se necessário manter um alto fator de refletividade nas superfícies espelhadas dos heliostatos por meio de uma limpeza regular. Este trabalho apresenta a proposta de um mecanismo automatizado para efetuar a limpeza de superfícies refletoras de heliostatos. O desenvolvimento deste dispositivo, desde sua concepção, passando pelas fases de construção, instalação e funcionamento, respeita padrões de eficiência da limpeza, visa o baixo custo de produção, facilidade de instalação e minimização dos impactos ambientais pertinentes, como, por exemplo, baixo consumo de água na operação. Por meio de experimentos realizados em situações reais de aplicação, utilizando para tal um heliostato de 8 m² localizado no Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, campus de Botucatu, constatou-se que o dispositivo proposto é uma opção operacionalmente e economicamente viável de solução ao *soiling* quando aplicado na região de Botucatu, principalmente se comparado a outras propostas de métodos de limpeza de heliostatos apresentadas nos cenários internacional e nacional. Além disso, por meio dos estudos sobre os elementos de segurança jurídica realizados em relação ao dispositivo, foi possível sugerir melhorias no processo de licenciamento ambiental de usinas CSP como um todo.

Palavras-chave: energia heliotérmica, espelhos, sujidade.

ABSTRACT

The possibility of reduction in the supply of conventional fuels, the continuous growing demand for energy and the current concern with the environmental scenario influence the development of researches regarding alternative, renewable and less polluting energy sources, which produces less environmental impact. Among these alternatives, it is worth mentioning the solar energy, available source and that can be explored from all its potentialities. Nowadays, one of many the technological process that uses solar energy for electricity generation is the solar thermal one, also known as Concentrated Solar Power (CSP), based on the use of mirrored surfaces that reflect and concentrate the direct sunlight in order to convert it into thermal energy, from which it generates water vapor that will initiate a reversible thermodynamic cycle which converts heat into energy (Rankine cycle). The phenomenon known as soiling consists in the depositing of different types of dirt on a surface exposed in a given environment. In the case of power tower CSP plants, the gradual accumulation of dust, dirt or even bird's excrements on the reflective surfaces of heliostats causes a significant reduction in the amount of solar radiation that reaches the receiver located at the top of the tower and decreases the efficiency of the entire system. Thus, it is necessary to maintain a high reflectivity factor in the mirrored surfaces of the heliostats through a regular cleaning. This work presents a proposal of an automated mechanism to clean up the reflective surfaces of heliostats. The development of this device, from its conception, through the stages of construction, installation and operation, regarding the cleaning efficiency standards, aimed at low production cost, ease of installation and minimizing the relevant environmental impacts, such as, low consumption of water during its operation. Through experiments in real situations, using a 8 m² heliostat located in the Department of Rural Engineering of UNESP's Faculty of Agronomic Sciences, Botucatu campus, it was verified that the proposed device is an operationally and economically option for the solution to soiling when applied at Botucatu's region, especially if compared to other proposed methods of heliostats cleaning presented in the international and national scenarios. In addition, through studies on the legal elements related to the device, it was possible to suggest improvements in the environmental licensing process of CSP plants altogether.

Keywords: heliothermic energy, mirrors, soiling.

1.1 INTRODUÇÃO

A atividade de produção de energia, particularmente, de energia elétrica, ingressou no século XXI em busca do desenvolvimento sustentável, conceito que alia a expansão da oferta, consumo consciente, preservação do meio ambiente e melhoria da qualidade de vida. Trata-se do desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. Assim, o desafio é reduzir o impacto ambiental e, ao mesmo tempo, ser capaz de suportar o crescimento socioeconômico do país em seus diversos segmentos.

A possibilidade de redução na oferta de combustíveis convencionais e não renováveis (carvão mineral, gás natural e petróleo) aliada ao crescimento da demanda por energia e a crescente preocupação com o meio ambiente impulsionam a pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam menor impacto ambiental. Dentre estas alternativas, destaca-se a energia solar, fonte disponível e passível de ser explorada a partir de todas as suas potencialidades.

Atualmente, dispõe-se das seguintes vias tecnológicas de aproveitamento da energia solar, sendo elas: a produção de energia térmica para aplicação residencial, comercial ou industrial, e geração de energia elétrica utilizando placas fotovoltaicas para conversão direta em energia elétrica ou através de tecnologias de *Concentrated Solar Power (CSP)*, onde se utilizam sistemas de concentração da radiação solar para obtenção de quantidades significativas de fluido a altas temperaturas para aplicação em ciclos térmicos de potência (CORGOZINHO et al., 2014).

A tecnologia CSP começou a ser desenvolvida na década de 1970. Porém, apenas na década de 1980 é que surgiram as primeiras centrais, localizadas na Itália, Espanha, França e Estados Unidos. Uma das principais vantagens da utilização da tecnologia CSP na geração de energia elétrica é a utilização de uma fonte inesgotável e limpa de energia, no caso: a radiação solar. No Brasil, embora exista vasta disponibilidade de radiação solar em comparação aos países citados

anteriormente, o interesse pelo uso das tecnologias CSP na geração de energia elétrica é recente.

A tecnologia CSP é baseada na utilização de superfícies espelhadas que refletem e concentram a irradiação solar direta com o objetivo de convertê-la em energia térmica, a partir da qual se gera vapor d'água que irá acionar um ciclo termodinâmico reversível que converte calor em trabalho, conhecido como Rankine (EPE, 2012).

As principais configurações de usinas termossolares são os concentradores cilíndrico-parabólicos (calhas), os concentradores Fresnel, os concentradores de prato parabólicos e os arranjos de heliostatos, que redirecionam a luz solar a um receptor estacionário (concentradores em torre) (SILVA, 2013).

O primeiro tipo de tecnologia utiliza espelhos em forma de calhas parabólicas (*parabolic troughs*) com absorvedor disposto na linha focal do coletor, constituído geralmente de um tubo metálico revestido por uma camada de tinta seletiva e envolto por um segundo tubo de vidro, cujo espaço entre os mesmos deve ser evacuado para evitar perdas por convecção (CORGOZINHO et al., 2014).

O segundo tipo de tecnologia CSP disponível é a tecnologia Fresnel, que utiliza refletores lineares móveis para concentração da radiação em absorvedor linear fixo (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

O terceiro tipo é constituído por pratos parabólicos (*parabolic dishes*), que são refletores em formato de parabolóide, na maioria dos casos, com um grupo motor/gerador individual para cada refletor localizado no ponto focal (CORGOZINHO et al., 2014).

Finalmente, o quarto tipo de tecnologia CSP é a chamada torre solar (*solar tower*), em que se utilizam milhares de espelhos para concentração dos raios solares em uma torre central fixa (CORGOZINHO et al., 2014).

Usinas termossolares que utilizam a tecnologia de torre central consistem de um campo de heliostatos que se movem independentemente e de um concentrador localizado no topo de uma torre. Heliostatos são dispositivos que seguem o movimento do Sol e que utilizam habitualmente um espelho ou conjunto de espelhos

que podem ser orientados ao longo do dia através de um eixo fixo de modo a redirecionar a luz solar para um receptor estacionário. O concentrador consiste de um feixe tubular por onde circula um fluido térmico, que é aquecido pela insolação refletida (EPE, 2012). Opcionalmente, estas centrais podem ter um sistema de armazenamento térmico para os períodos em que não há radiação solar disponível (EUSTÁQUIO, 2011).

O *soiling* consiste no depósito de diferentes tipos de sujeiras em uma superfície exposta em um dado ambiente. No caso de usinas CSP de torre central, o acúmulo gradativo de poeira, sujeira ou até mesmo de excremento de pássaros nas superfícies refletoras dos heliostatos causa uma redução significativa na quantidade de radiação solar que atinge o receptor posicionado no alto da torre e diminuição da eficiência de todo o sistema. Assim, faz-se necessário manter um alto fator de refletividade nas superfícies espelhadas dos heliostatos por meio de uma limpeza regular. Ressalta-se que a operação de limpeza das superfícies refletoras deve focar a questão ambiental, como, por exemplo, sem consumo de um alto volume de água, bem como, não prejudicar o funcionamento e produtividade de toda a usina.

Atualmente, são escassas as publicações relacionadas à medição dos impactos da sujidade (*soiling*) no índice de refletividade dos espelhos componentes de heliostatos. Soma-se a isto o fato de que a sujidade é um fenômeno extremamente dependente do local em que a usina CSP está situada. Em alguns casos extremos, as perdas podem atingir valores até 25% por semana, conforme Wolfertstetter (2013).

Mais especificamente, estudos feitos na Plataforma Solar de Almería, na Espanha, comprovaram que o acúmulo gradativo de sujeira nas superfícies espelhadas pode representar, semanalmente, perdas de 3,6% na taxa de refletividade dos espelhos. Já na usina CSP de NOOR III, no Marrocos, esse valor é ainda maior: 0,63% em um dia, ou 4,2% por semana (SARVER et al., 2013; COSTA et al., 2016).

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um dispositivo automatizado para efetuar a limpeza de superfícies refletoras de heliostatos em usinas CSP baseadas em tecnologia de torre central. O desenvolvimento deste dispositivo, contemplou as fases de concepção, construção, instalação e

funcionamento, respeitando padrões de eficiência da limpeza, visando o baixo custo de produção e instalação e a minimização dos impactos ambientais pertinentes, como, por exemplo, baixo consumo de água na operação.

Para atingir objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar os principais métodos existentes para limpeza de superfícies refletoras em usinas CSP, de modo a eleger, dentre as opções, a(s) que melhor(es) se aplica(m), no caso deste trabalho;
- b) Demonstrar o desenvolvimento do dispositivo automatizado para limpeza de superfícies refletoras de heliostatos voltado para atuação de acordo com as características climáticas da região de Botucatu-SP, considerando as variáveis econômicas e ambientais envolvidas no seu processo de construção e operação;
- c) Avaliar o funcionamento do dispositivo para limpeza de superfícies espelhadas construído por meio de situações reais de aplicação;
- d) Analisar a viabilidade financeira do dispositivo automatizado para limpeza de superfícies refletoras de heliostatos;

De acordo com Mendes (2013), os principais desafios relacionados à adoção e implementação de tecnologias baseadas em CSP em âmbito mundial são:

- a) À produção de heliostatos;
- b) À produção de sistemas primários de concentração linear, parabólicos ou planos;
- c) À produção de sistemas secundários de concentração linear e pontual;
- d) À produção de receptores para sistemas de concentração linear e pontual;
- e) À produção do subsistema de armazenamento;
- f) Aos componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos associados às centrais térmicas;
- g) À produção do *software* de controle (subsistemas e sistema global);
- h) À engenharia associada ao desenho, construção e manutenção de centrais térmicas.

Entende-se que os objetivos desta pesquisa estão diretamente ligados à afirmação de Mendes (2103) sobre a produção de heliostatos e a necessidade de um maior desenvolvimento de componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos associados às centrais térmicas (itens a; f) e indiretamente aos demais itens citados.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

Com o intuito de fundamentar teoricamente o trabalho, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre diversos tópicos relacionados ao tema da pesquisa.

Uma vez que o estudo objetiva propor um dispositivo automatizado para efetuar a limpeza de superfícies refletoras de heliostatos em usinas solar-térmicas baseadas em tecnologia de torre central, a pesquisa bibliográfica iniciou-se pelo levantamento do atual cenário energético brasileiro e a participação do recurso solar na matriz energética do país. Posteriormente, optou-se pela elaboração de um capítulo sobre a energia solar concentrada (CSP), visando um melhor entendimento sobre seus aspectos históricos, visão geral sobre o seu funcionamento e os quatro tipos de tecnologias disponíveis atualmente no mercado. Subsequentemente, por se tratar um trabalho focado em um componente essencial de uma usina CSP de torre solar, a literatura sobre os heliostatos e o funcionamento dos mesmos foi pesquisada, para então, por fim, abordar-se a questão do *soiling*, ou seja, o acúmulo de sujeira em superfícies espelhadas e seus impactos na performance dos heliostatos, bem como métodos de limpeza existentes.

1.2.1 O cenário energético brasileiro e a energia solar

O desenvolvimento econômico, a rapidez da inserção de inovações tecnológicas no cotidiano dos indivíduos e as mudanças nos hábitos da população são fatores que estão diretamente ligados ao aumento contínuo no consumo de energia no Brasil e no mundo. Ao mesmo tempo, as fontes fósseis de energia estão se esgotando e existe uma crescente preocupação global com o meio ambiente.

Durante todo o século XX, a oferta farta de energia, obtida principalmente a partir dos combustíveis fósseis como petróleo e carvão mineral, deu suporte ao crescimento e às transformações da economia mundial. Atualmente, o cenário mudou e vivencia-se uma nova realidade: a necessidade do desenvolvimento sustentável.

A partir dos anos 1980, termos como “eco-desenvolvimento” e “desenvolvimento sustentável”, se convergiram nas suas propostas, apontando para a necessidade do equilíbrio entre o ambiental, o social e o econômico (CASAGRANDE, 2004). Por desenvolvimento sustentável, entende-se o processo de mudança no qual a exploração dos recursos, a orientação dos investimentos, os rumos do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional estão de acordo com as necessidades atuais e futuras.

A Organização das Nações Unidas – ONU (1987, documento A/42/427) assegura que a sustentabilidade exige um novo padrão de crescimento econômico a ser garantido. O desenvolvimento sustentável é uma correção, uma retomada do crescimento, alterando a qualidade do desenvolvimento, tornando-o menos intensivo, menos exigente em matérias-primas e mais equitativo para todos (ONU, 1987).

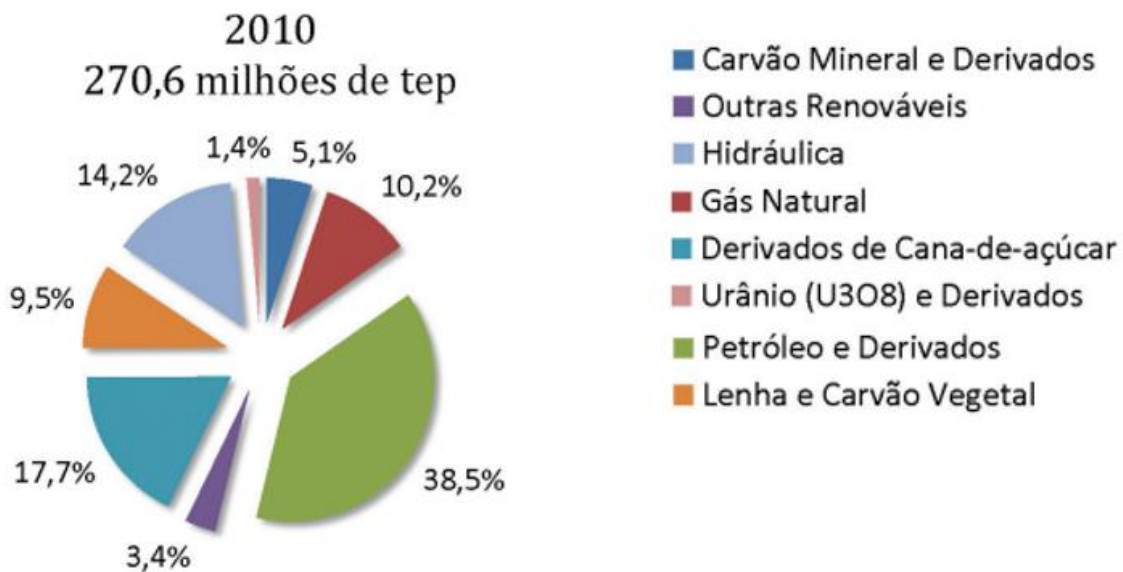
O crescimento acentuado do consumo de energia, embora possa refletir o um eventual aquecimento econômico, bem como a melhoria da qualidade de vida da população, tem aspectos negativos. Um deles é a possibilidade do esgotamento dos recursos utilizados para a produção de energia, como já mencionado. Outro é o impacto ao meio ambiente produzido por essa atividade. Finalmente, citam-se os elevados investimentos exigidos na pesquisa de novas fontes e construção de novas usinas (ANEEL, 2008).

Neste cenário, aumenta-se a necessidade e a importância do desenvolvimento de pesquisas relacionadas à fontes alternativas de energia, sendo estas renováveis e com impacto reduzido no meio ambiente. Destacam-se, assim, a energia hidroelétrica, eólica, solar, geotérmica e a biomassa.

Goerck (2008) destaca que a energia solar constitui um recurso sobre a qual ainda não foram impostas regras de domínio para uso e aproveitamento e que o incentivo ao uso da mesma é passível de utilização e exploração somente se houver interesse dos meios público e privado em seu desenvolvimento e implementação, visto que o consumidor, usualmente, opta por estes sistemas pelo interesse econômico.

Tolmasquim (2012) apresenta a oferta interna de energia no Brasil expressada em tep – tonelada equivalente de petróleo – unidade de energia definida como o calor libertado na combustão de uma tonelada de petróleo cru (aproximadamente 42 gigajoules), costumeiramente utilizada para expressar grandes quantidades de energia, conforme Figura 1.

Figura 1 - Oferta de energia no Brasil



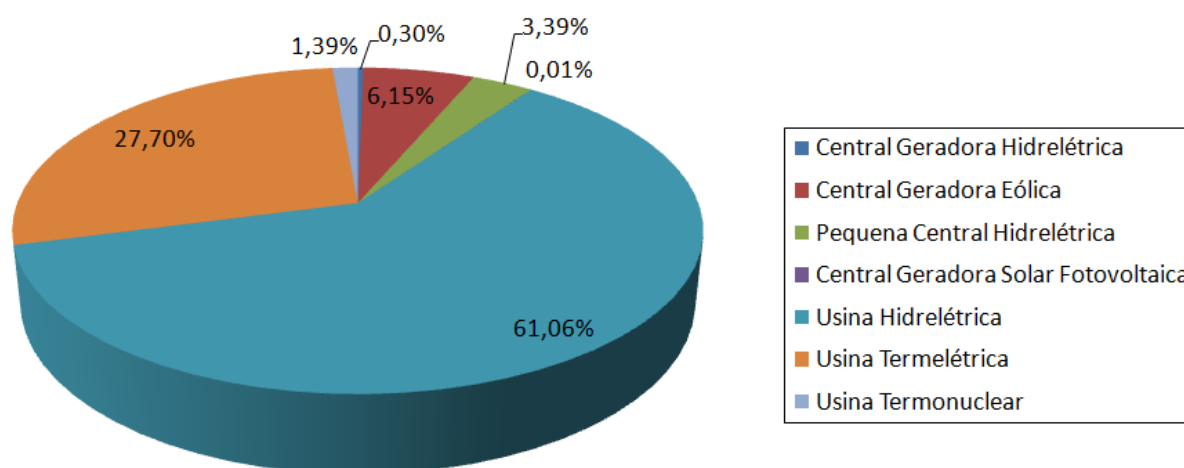
Fonte: TOLMASQUIM (2012, p. 250).

Observa-se que 38,5% da energia brasileira está vinculada ao petróleo e seus derivados; 17,7% aos derivados de cana-de-açúcar e 14,2% refere-se à energia hidráulica. A energia solar está inserida nos 3,4% relacionados a outras fontes renováveis (TOLMASQUIM, 2012).

Sobre a matriz elétrica brasileira, esta possui 4.521 empreendimentos em operação, totalizando 143,6 GW de potência instalada, fundamentada na hidroeletricidade (61,06% do total), de acordo informações do Banco de Informação da Geração (BIG) da ANEEL, em maio de 2016. Está prevista para os próximos anos uma adição de 27.362.507 kW na capacidade de geração do país, proveniente dos 209 empreendimentos atualmente em construção e mais 626 em empreendimentos com construção não iniciada (ANEEL, 2016).

Em virtude dos fatores geográficos – o Brasil é o país com a maior capacidade mundial de armazenamento de água – as hidrelétricas são hoje o mais importante recurso para a produção de energia elétrica do país. Sua participação na matriz energética do Brasil abrange 61,06%, conforme mostra a Figura 2. Pelo fator de ser predominantemente hídrica, a matriz nacional é privilegiada em relação à emissão de gases poluentes, apresentando produção energética com baixo custo e limpa em termos de emissão de gases do efeito estufa. Contudo, a matriz hídrica apresenta problemas relacionados à sazonalidade, criando lacunas entre o potencial instalado e a energia elétrica produzida durante períodos de estiagem. Estes problemas sazonais se evidenciaram nos panoramas passados no setor elétrico brasileiro, os quais remetem à crise do racionamento de energia elétrica no Brasil, no ano de 2001, e à situação crítica de abastecimento com o período de forte estiagem e as elevadas temperaturas registradas em 2014, que reacenderam a discussão sobre a possibilidade de racionamento de energia elétrica no país. Ambos são exemplos associados à falta de planejamento do setor, que geraram problemas em curto, médio e longo prazo, comprometendo o crescimento econômico nacional (SANTOS; CARDOSO JR., 2016).

Figura 2 - Percentuais de geração de eletricidade de acordo com os empreendimentos em operação no Brasil

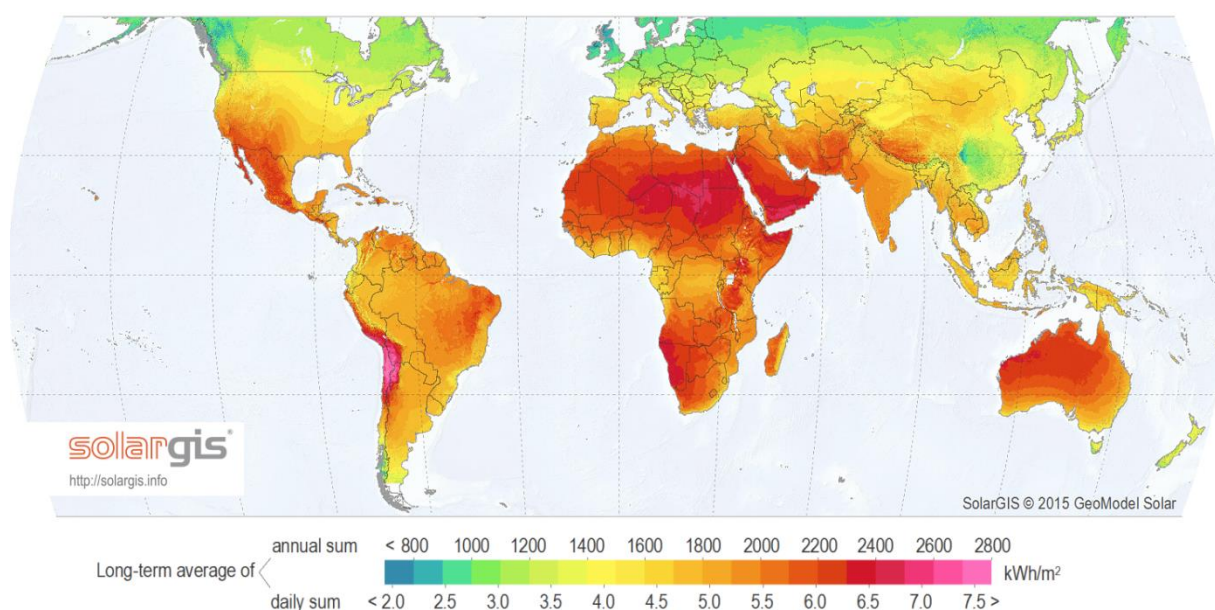


Fonte: Adaptado de ANEEL (2016).

Apesar de as energias renováveis desempenharem um papel importante no Brasil do ponto de vista da produção de eletricidade, nota-se que a energia solar é

pouco explorada. A capacidade instalada de energia solar, até então exclusivamente fotovoltaica, no Brasil é de aproximadamente 27 MW, o que representa aproximadamente 0,01% da matriz energética brasileira (ANEEL, 2016). Esta estatística é contrastante em relação à abundante disponibilidade de radiação solar incidente no país, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Mapa mundial de radiação solar global



Fonte: SOLARGIS (2015).

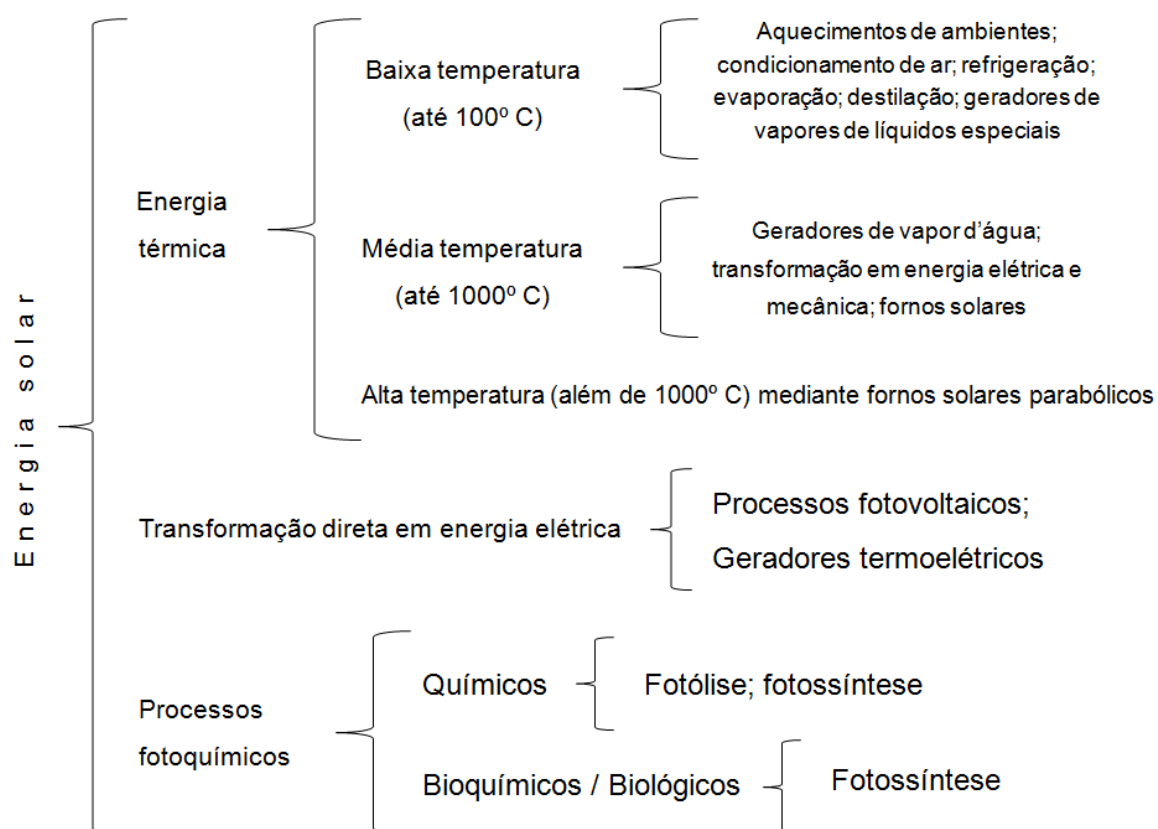
O Brasil apresenta um alto potencial para aproveitamento da fonte solar de energia, pois o país possui índices de radiação solar global incidente superiores aos encontrados na maioria dos países europeus. Os valores de radiação solar global incidente em qualquer região do território nacional são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650 kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²). Nestes países, os projetos para aproveitamento do recurso solar são amplamente disseminados e alguns contam com grandes subsídios governamentais (SANTOS; CARDOSO JR., 2016).

Segundo dois relatórios recentes da Agência Internacional de Energia (AIE ou *International Energy Agency* - IEA), o sol poderá ser a maior fonte mundial de eletricidade em 2050, à frente das matrizes fósseis, eólica, hidrelétrica e nuclear. Sistemas fotovoltaicos e solar térmicos poderiam gerar até 27% da eletricidade do

mundo até 2050, evitando a emissão de mais de 6 bilhões de toneladas de dióxido de carbono por ano até 2050 (IEA, 2014).

De acordo com Cometta (1982), o sol fornece energia por três tipos de processo, em base aos quais podem distinguir outras tantas classes de meio de aproveitamento, sendo: (1) processos térmicos, que se subdividem em três subclasses - alta, média e baixa temperatura; (2) processos elétricos; e (3) processos químicos. A Figura 4, a seguir, permite a visualização e a classificação das várias modalidades de aproveitamento e as diversas maneiras de utilizar a energia solar.

Figura 4 - Possibilidade de aproveitamento da energia solar



Fonte: COMETTA (1982, p. 33).

É possível, ainda, distinguir os empregos da energia solar em duas grandes classes, de acordo com os seus respectivos aproveitamentos do espectro de energia solar incidente (ou apenas uma faixa do espectro). São consideradas aplicações eletivas, aquelas para os quais têm importância, além da potência total, a

distribuição da energia no espectro das frequências. Enquadram-se nas aplicações seletivas os processos fotoquímicos e as pilhas fotovoltaicas. Em uma aplicação não seletiva, importa apenas a potência total, como no caso de processos que envolvem a absorção de calor (COMETTA, 1982).

Segundo Corgozinho et al. (2014), no que se refere à energia solar, atualmente dispõe-se de três vias tecnológicas de aproveitamento deste recurso, sendo: a produção de energia térmica para aplicação residencial, comercial ou industrial; geração de energia elétrica utilizando placas fotovoltaicas para conversão direta em energia elétrica; ou através de tecnologias de *Concentrating Solar Power* (CSP), onde se utilizam sistemas de concentração da radiação solar para obtenção de quantidades significativas de fluido a altas temperaturas para aplicação em ciclos térmicos de potência.

Para o aproveitamento da energia solar a temperaturas elevadas, é preciso concentrar, mediante espelhos ou lentes, a radiação solar sobre uma zona muito restrita. A máxima temperatura que se pode obter depende da relação entre a superfície que coleta a energia solar e a seção mínima do feixe de raios solares concentrados. Os painéis concentradores devem estar constantemente orientados ao sol. Assim, é possível a obtenção de altíssimas temperaturas, não obtíveis com outros métodos. Tem-se a vantagem de operar sem chama, fumaça ou gases ionizados (COMETTA, 1982).

A tecnologia CSP é baseada na utilização de superfícies espelhadas que refletem e concentram a radiação solar direta com o objetivo de convertê-la em energia térmica, a partir da qual se gera vapor d'água que irá acionar um ciclo termodinâmico reversível que converte calor em trabalho, conhecido como Rankine. As tecnologias de energia solar concentrada envolvem as seguintes fases: coleta da radiação solar; concentração da radiação num receptor sob a forma de energia térmica; transporte da energia térmica para o sistema de conversão de energia; conversão da energia térmica em energia elétrica (EPE, 2012).

Os sistemas de energia solar térmica concentrada produzem energia elétrica ao converter a energia solar em calor de alta temperatura usando várias configurações de superfícies espelhadas. Estes sistemas focam a radiação solar direta por meio de dispositivos ópticos para a área onde o receptor está localizado, transformando a

radiação em calor de alta temperatura, suscetível à produção de vapor (SILVA, 2013).

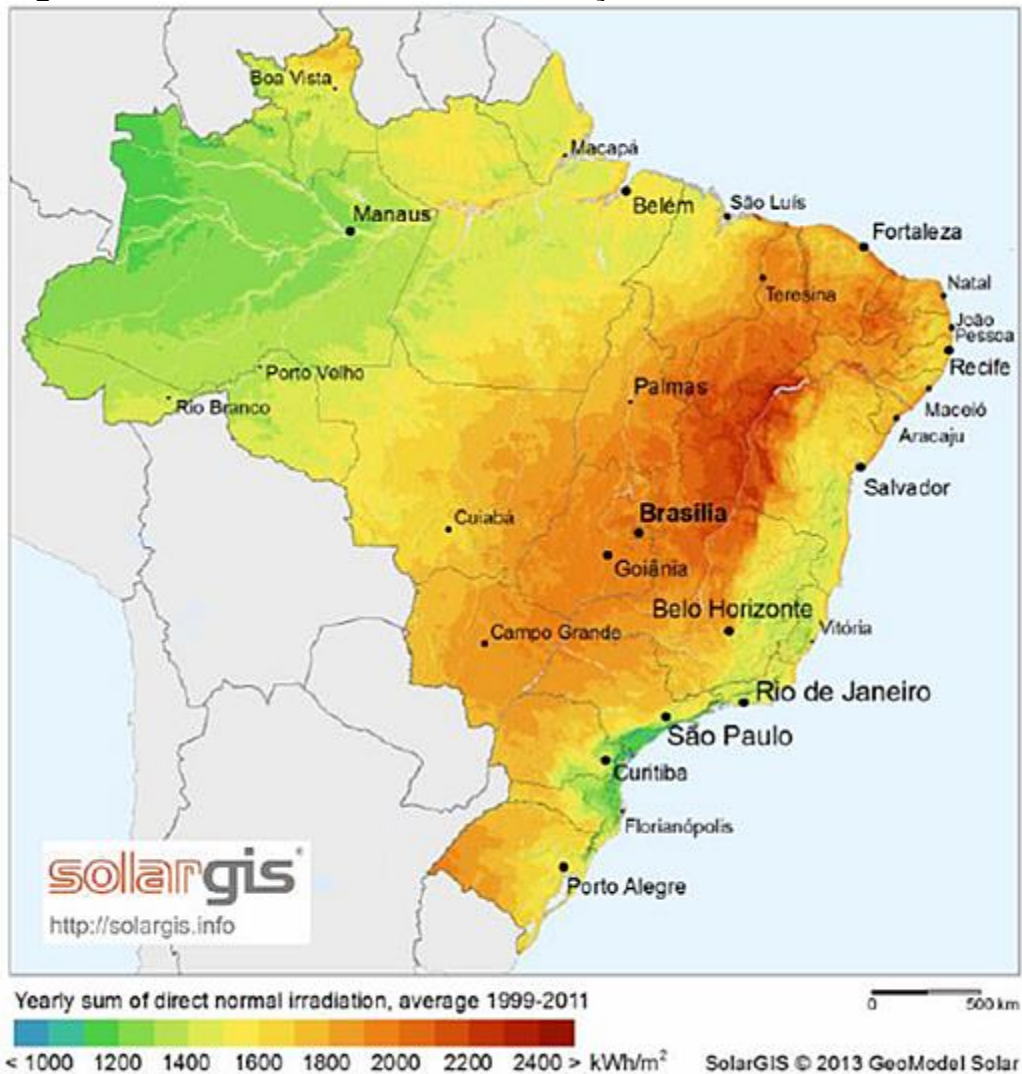
A tecnologia de energia solar concentrada, também chamada de energia termosolar, utiliza concentradores ópticos para criar altos níveis de fluxo solar em um receptor. No receptor, a radiação solar é absorvida e convertida em calor que posteriormente, é transportado para um ciclo de potência térmica ou para um sistema de armazenamento. No ciclo de potência, o calor é convertido em eletricidade (BUCK et al., 2014).

De acordo com Palz (1981) a componente difusa da radiação solar é totalmente descartada em sistemas que empregam coletores solares de concentração. Ratificando essa informação, Buck et al. (2014) descreve que um requisito importante para a tecnologia CSP é a disponibilidade de altos níveis de radiação solar direta, pois os sistemas CSP só podem converter em energia a esse tipo de radiação. A componente difusa não pode ser concentrada e, portanto, não é utilizável em um sistema CSP. Ainda, conforme os autores, geralmente, um nível de radiação solar direta normal anual (DNI) de 2000kWh/m²ano (~5.5kWh/m²/dia) é considerado satisfatório para a viabilidade técnica e econômica de usinas CSP.

As informações sobre a radiação solar direta apresentadas na Figura 5, a seguir, permitem concluir que existe um grande potencial no Brasil para o desenvolvimento de tecnologias baseadas em CSP. O país apresenta abundante disponibilidade de radiação solar direta, principalmente nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e parte da região Sudeste.

No Brasil, embora exista vasta disponibilidade de radiação solar direta, o interesse pelo uso das tecnologias CSP na geração de energia elétrica é recente. Os poucos projetos pilotos existentes ainda se encontram em fase inicial de implantação e depende do fortalecimento de investimentos em projetos e pesquisa nacional no setor (MALAGUETA, 2013).

Figura 5 - Média de incidência de radiação solar direta no Brasil



Fonte: SOLARGIS (2013).

Um dos fatores limitantes ao estabelecimento da tecnologia CSP no Brasil é a carência de profissionais qualificados (mão de obra especializada) e de laboratórios especializados para dar suporte ao seu desenvolvimento. São escassas as iniciativas para disseminação dos conhecimentos sobre CSP no país. Apenas recentemente o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), em São José dos Campos/SP, inaugurou um laboratório voltado a energias renováveis com o objetivo dar suporte computacional a atividades de pesquisa envolvendo simulação numérica de processos de transferência de calor e massa, com foco na heliotermia. Além disso destacam-se, também os cursos de formação em energia heliotérmica ministrados pelo Instituto Superior de Inovação e Tecnologia (ISITEC) em parceria com a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) (AEB, 2016).

Segundo Goerck (2008), outra barreira encontrada pelos órgãos governamentais e não governamentais, investidores e empresas ligadas ao setor de energia é a falta de informações confiáveis sobre os recursos renováveis, que permitiriam avaliar riscos associados a fatores climático-ambientais envolvidos em projetos de utilização destas fontes de energia.

1.2.2 Energia solar concentrada e as configurações de usinas existentes

A primeira utilização conhecida da técnica de concentração da radiação solar e sua aplicação a altas temperaturas remonta ao ano de 212 a.C., quando Arquimedes utilizou espelhos côncavos para incendiar navios romanos, durante a Segunda Guerra Púnica (assedio de Siracusa), retardando a queda de sua cidade. Embora não haja nenhuma prova de que este fato tenha realmente ocorrido, a Marinha Grega recriou-o realizando uma experiência em 1973 na qual incendiou com sucesso um barco de madeira a 50 metros de distância (EUSTÁQUIO, 2011).

Ainda sobre o contexto histórico da aplicação de altas temperaturas provenientes da energia solar, Cometta (1982) cita que fornos solares para a fusão de metais foram utilizados no século XVII em países como França e Dinamarca.

Também, o químico francês Lavoisier e o cientista Inglês Joseph Priestley, em 1774, fizeram uso de um forno solar com um sistema de lentes em suas experiências. Desenvolveram a teoria da combustão através da concentração dos raios solares num tubo de ensaio com óxido de mercúrio, recolhendo o gás produzido com a ajuda da energia solar e queimando uma vela no gás (COMETTA, 1982; EUSTÁQUIO, 2011).

Por volta de 1860, o matemático Francês August Mouchet propôs, juntamente com o seu assistente, Abel Pifre, máquinas a vapor alimentadas por energia solar. Em 1978, foi exibida uma pequena prensa tipográfica na Feira Mundial de Paris. o acionamento da prensa era feito pela luz solar focada por meio de um refletor parabólico para uma caldeira a vapor acoplada à prensa (EUSTÁQUIO, 2011).

Em 1913, C. V. Boys desenvolveu um motor com cinquenta cavalos de potência para bombear água do rio Nilo para irrigação, perto do Cairo. O dispositivo usava

longos refletores parabólicos que focavam a radiação solar num tubo central de concentração (EUSTÁQUIO, 2011).

Foi o professor italiano Giovanni Francia quem desenhou e construiu a primeira central de energia solar concentrada que iniciou trabalhos em Sant'Ilario, próximo a Gênova, Itália no final da década de 1970. Esta central possuía a planta arquitetônica das atuais centrais de energia solar concentrada com um receptor central e campo de coletores solares. A central era capaz de produzir 1MW com vapor super aquecido a 100 bar e a 500° Celsius (SILVI, 2005).

Porém, o interesse comercial generalizado na energia solar como fonte para a produção de eletricidade e calor só surgiu após a década de 1970. Foram as crises energéticas ocorridas na época (incluem-se o embargo dos países da OPEP - Organização dos Países Exportadores de Petróleo - em 1973 e a revolução no Irã em 1979), que, além de acionarem o sinal de alerta sobre a dependência mundial do petróleo, serviram como incentivo aos países na busca por alternativas e tecnologias para se obter energia a partir de fontes renováveis (EUSTÁQUIO, 2011).

As primeiras centrais heliotérmicas comerciais foram instaladas na década de 1980 em países como Itália, Espanha, França e Estados Unidos. Nesse contexto, destacam-se as seguintes usinas: Aulerios, em Adrano, Itália, em 1981, do tipo receptor central; e SSPS/CRS e SSPS/DCS, ambas em Almería, Espanha, no mesmo ano. Em 1982, surgiu a usina de Thermis, em Targasonne, França, com capacidade para geração de 2,5 MW de energia. No mesmo ano, começou a funcionar o projeto *Solar One*, um sistema de receptor central de 10 MW financiado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e por um consórcio industrial que pretendia provar a viabilidade destes sistemas para a produção de eletricidade. Em 1986, começou a operar a central SEGS (*Solar Energy Generating Systems*), localizada no Deserto Mojave, nos Estados Unidos. Durante as décadas de 1980 e 1990, as usinas CSP comerciais construídas nos Estados Unidos somavam uma capacidade de geração total de 354 MW de energia (EUSTÁQUIO, 2011; BUCK et al., 2014).

Com o passar dos anos, o aumento dos preços da energia e as evidências do aquecimento global e das emissões de gases causadores do efeito de estufa, fizeram com que a implementação de sistemas focados na utilização de fontes

renováveis no mercado de energia ganhou cada vez mais importância. Por volta do ano de 2007, a instalação de novas usinas CSP ganhou apoio político e legislativo. Citam-se, aqui, os exemplos do "*Renewable Portfolio Standard*" nos Estados Unidos e do "*feed-in tariff*", na Espanha. Desde então, a capacidade total de usinas CSP instaladas plantas cresceu significativamente (BUCK et al., 2014). Ainda sobre o mecanismo *feed-in*, Dutra (2007 apud MALAGUETA, 2013) destaca que o mesmo cria uma estabilidade financeira para o investidor ao garantir a compra da energia por um período pré-determinado. Os riscos financeiros são minimizados uma vez que são protegidos através dos contratos de compra e venda de energia a um prêmio ou preço pré-determinados, garantindo um aumento de capacidade no curto prazo.

Existem quatro configurações de usinas CSP, nomeadas, geralmente, de acordo com a geometria dos coletores, sendo: os cilíndrico-parabólicos, os concentradores lineares Fresnel, os prato parabólicos e a tecnologia de torre central (SILVA, 2013).

O primeiro tipo de tecnologia utiliza espelhos em forma de calhas parabólicas (*parabolic troughs*) que buscam captar e direcionar os raios solares na direção dos tubos de absorção estrategicamente posicionados em sua trajetória. Dentro dos tubos de absorção há circulação de fluido térmico que, após aquecido, pode chegar à temperaturas de até 400°C. Devido à alta temperatura, o fluido térmico passa a vaporizar-se seguindo pelos tubos na direção das turbinas que conectadas à geradores irão transformar o calor do mesmo em eletricidade (FERNANDES et al., 2016).

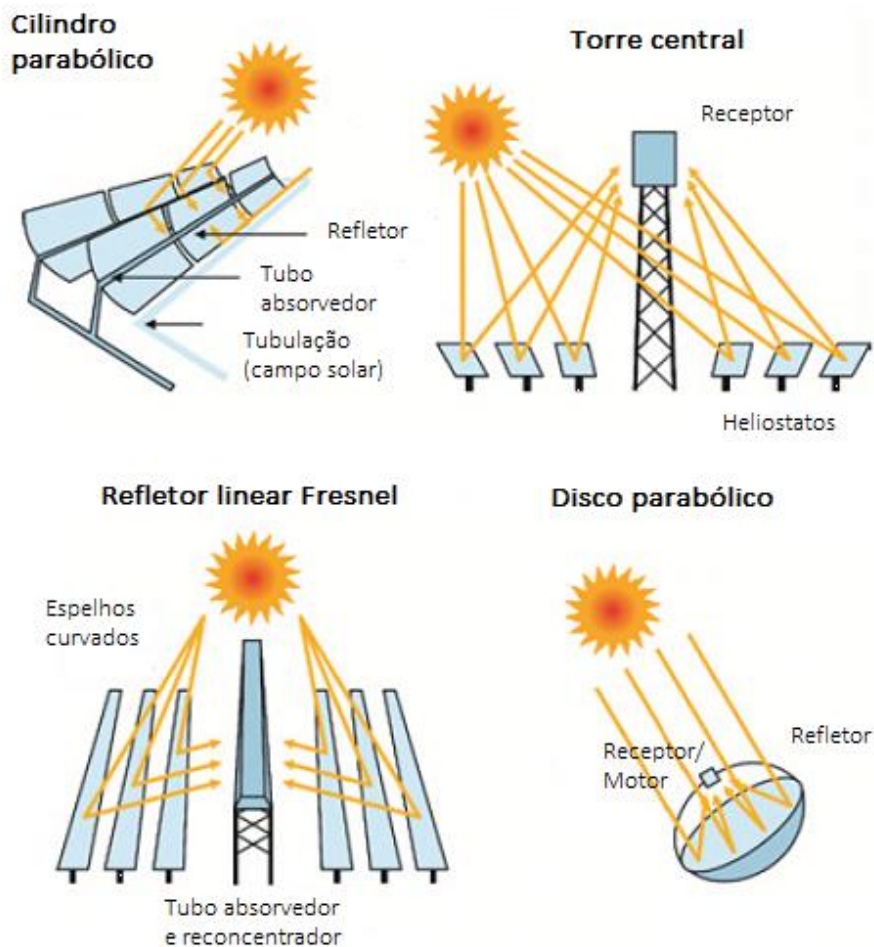
O segundo tipo de configuração disponível é a tecnologia Fresnel, onde os espelhos possuem formato plano e são posicionados em filas horizontais, afim de refletir os raios solares na direção do tubo de absorção que encontra-se centralizado entre as filas de espelhos inclinados em sua direção (FERNANDES et al., 2016).

O terceiro tipo é constituído por pratos parabólicos (*parabolic dishes*) ou discos parabólicos (*dish stirling*) que buscam captar os raios solares incidentes e refleti-los na direção de um receptor que encontra-se posicionado em seu foco de concentração (FERNANDES et al., 2016).

Finalmente, o quarto tipo de tecnologia é a chamada torre solar (*solar tower*), em que se utilizam milhares de espelhos automatizados que buscam direcionar os raios solares para um uma torre central fixa. O fluido existente na torre é aquecido em altíssima temperatura, dando início à um processo de vaporização devido à grande quantidade de energia concentrada. A temperatura do vapor gerado pode chegar aos 1000°C, onde no processo seguinte, turbinas conectadas à geradores captam este vapor aquecido convertendo a energia existente em eletricidade (CORGOZINHO et al., 2014; FERNANDES et al., 2016).

A Figura 6, a seguir, apresenta as principais configurações de usinas CSP existentes atualmente.

Figura 6 - Quatro possíveis configurações de usinas termossolares



Fonte: Adaptado de BUCK et al. (2014, p. 12).

O total acumulado de geração de energia por empreendimentos baseados em CSP em todo o mundo, em 2013, foi de 3.483 MW. A maior parcela desse valor corresponde às usinas do tipo cilindro parabólico, com 3.280MW ou 95,4%. Os sistemas de torre central contribuem com 104MW ou 3%, seguido pela tecnologia Fresnel, com 53MW ou 1,5%. Os sistemas de pratos parabólicos não apresentam, ainda, participação expressiva (BUCK et al., 2014).

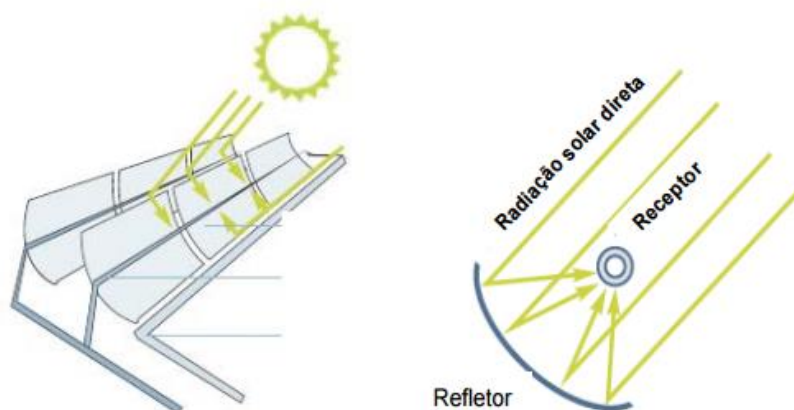
Nos subitens seguintes, serão detalhadas as quatro tecnologias CSP apresentadas.

1.2.2.1 Cilindros parabólicos (*parabolic trough*)

Os coletores cilíndricos parabólicos, também chamados de calhas parabólicas, são revestidos por um material refletor e, como o próprio nome sugere, têm formato parabólico. Ao longo da linha de foco do refletor, posiciona-se um tubo metálico preto, coberto por um tubo de vidro para evitar perdas de calor, denominado receptor. Quando a parábola está direcionada para o sol, a radiação direta normal é refletida pela superfície e concentrada no receptor, aquecendo o fluido que circula internamente no tubo (KALOGIROU, 2009).

A Figura 7 apresenta um esquema que representa a concentração da radiação solar direta em um concentrador parabólico.

Figura 7 - Concentração da radiação em uma calha parabólica

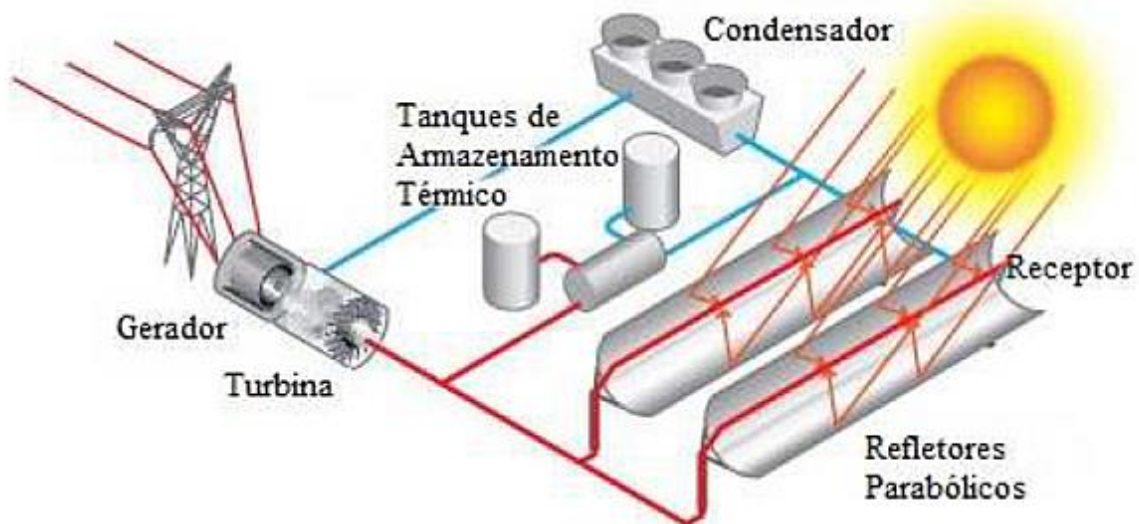


Fonte: LODI (2011).

Os concentradores cilíndricos parabólicos têm sua superfície refletora na forma da metade de um cilindro. Os espelhos servem para concentrar os raios solares em tubos receptores termicamente eficientes que contêm um fluido de transferência de calor. Este fluido é aquecido e bombeado através de uma série de trocadores de calor para produzir vapor superaquecido, que alimenta uma turbina convencional para produzir eletricidade (MANCINI et al., 1997 apud GOERCK, 2008).

Eustáquio (2011) explica com maiores detalhes o funcionamento de uma usina heliotérmica baseada na tecnologia de cilindros parabólicos: essas centrais são constituídas por grandes campos de coletores solares, um fluido de transferência de calor/sistema de geração de vapor e uma turbina de ciclo Rankine. Uma representação da explicação do autor é mostrada na Figura 8. Opcionalmente, pode ser adicionado um sistema de backup com armazenamento térmico ou queima de combustíveis fósseis.

Figura 8 - Funcionamento de uma usina CSP baseada em cilindros parabólicos



Fonte: EUSTÁQUIO (2011, p. 12).

As primeiras plantas comerciais baseadas na tecnologia de cilindros parabólicos do mundo começaram a operar em meados da década de 1980, no estado da Califórnia, EUA, onde foi construído um complexo de nove plantas conhecidas como SEGS (*Solar Electric Generating Systems*), numeradas de um a nove em algarismos romanos (DUFFIE; BECKMAN, 2006; KALOGIROU, 2009).

A Tabela 1 apresenta as características das nove plantas SEGS localizadas na Califórnia, EUA.

Tabela 1 - Plantas CSP de cilindros parabólicos - SEGS (*Solar Electric Generating Systems*)

Planta	Ano de operação	Potência líquida (MWe)	Temperatura de saída do fluido (°C)	Campo solar (mil m ²)	Eficiência da turbina solar (%)	Eficiência da turbina fóssil (%)	Produção anual (MWh)
SEGS I	1985	13,8	307	83	31,5	-	30.100
SEGS II	1986	30	316	190	29,4	37,3	80.500
SEGS III	1987	30	349	230	30,6	37,4	92.780
SEGS IV	1987	30	349	230	30,6	37,4	92.780
SEGS V	1988	30	349	250	30,6	37,4	91.820
SEGS VI	1989	30	390	188	37,5	39,5	90.850
SEGS VII	1989	30	390	194	37,5	39,5	92.646
SEGS VIII	1990	80	390	464	37,6	37,6	252.750
SEGS IX	1991	80	390	484	37,6	37,6	256.125

Fonte: Adaptado de NREL (2016a) .

Nota-se uma evolução em relação à potência líquida, temperatura de saída do fluido e capacidade de produção de energia por ano. Além disso, no passar dos anos, outros tipos de coletores foram sendo desenvolvidos e testados nas diferentes SEGS, alguns com menor peso e com menos propensão às deformações, reduzindo os esforços de torção e flexão da estrutura durante a operação, o que acarreta em melhor performance ótica e, conseqüentemente, maior eficiência (KALOGIROU, 2009).

Atualmente, a tecnologia CSP de cilindros parabólicos é a mais consolidada e madura do mercado. Aproximadamente 95% do total acumulado de geração de energia por empreendimentos CSP em todo o mundo, em 2013, correspondeu às usinas do tipo cilindro parabólico: estão em operação 80 usinas utilizando o conceito de cilindros parabólicos; 21 usinas usando o conceito de torre central; duas usando o conceito de prato paraboloide e doze utilizando o conceito refletor linear de Fresnel (BUCK et al., 2014).

No Brasil, evidenciam-se alguns empreendimentos envolvendo a tecnologia de cilindros parabólicos, sendo, de acordo com Brancalião (2015) os principais:

- a) Projeto Cemig e Luz International/FlachgasFinal, realizado na década de 1980. Estudo de viabilidade de uma planta solar térmica com tecnologia de cilindros parabólicos nas cidades de Janapuba e Januária, região norte do Estado de Minas Gerais;
- b) Projeto Cemig desenvolvido pelo Cefet-MG, entre os anos de 2004 e 2009. Construção de um sistema otimizado integrado de concentradores de calhas parabólicas e rastreador solar com potência instaladas de 10 kW;
- c) Projeto HELIOTERM (2012-2015, porém ainda em andamento). Prevê a implantação de uma planta piloto de geração heliotérmica (1 MW) em Petrolina/PE. Financiadora: FINEP; Cofinanciadora: Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (Sectec/PE), Executor: CEPEL e Co-Executor: UFPE.

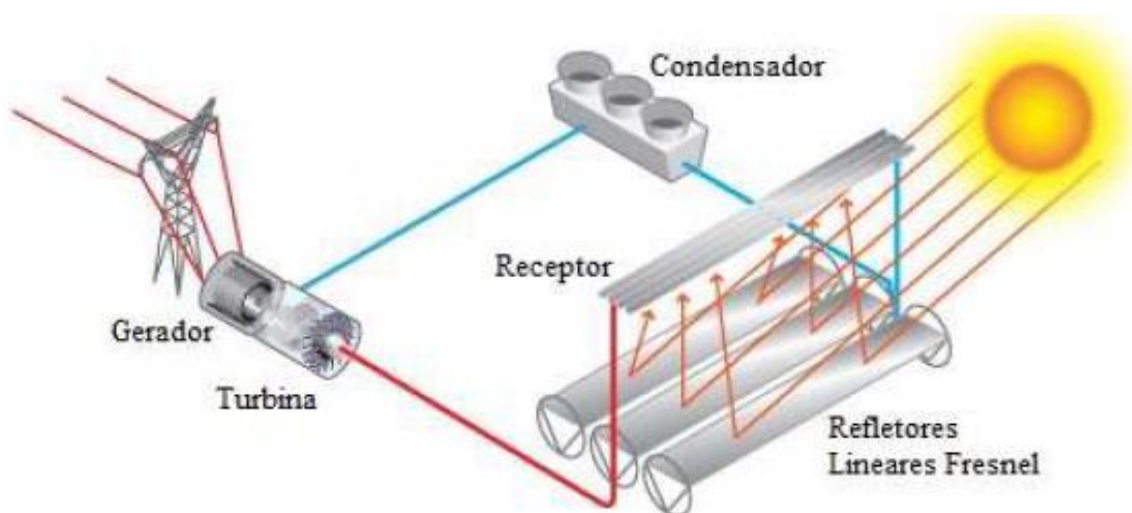
Além dos projetos citados, existem outros relacionados à plantas comerciais com tecnologia de calhas parabólicas, sendo: Coremas/PB (50 MW); Serra Talhada/PE (2 plantas de 30 MW cada) e Araçuaí/MG (20 MW) (BRANCALIÃO, 2015).

Silva (2013), considera que os sistemas de refletores parabólicos lineares apresentam como principais vantagens: o fato de estarem disponíveis comercialmente – no ano de 2010 havia 1.220 MW instalados e esses sistemas já geraram mais de 10.000 GWh de energia elétrica; permitirem temperaturas de operação potencial superior a 500°C, sendo que 400°C já foram comercialmente provados; rendimento comprovado comercialmente de 14% da conversão solar para saída elétrica; investimento e custos de operação e manutenção comercialmente provados; modularidade e melhor uso do terreno em relação às demais tecnologias CSP; necessidade reduzida de materiais; conceito híbrido provado; e capacidade de integração com sistemas de armazenamento térmico. Porém, o mesmo autor cita alguns pontos fracos destes sistemas, sendo o principal deles relacionado à utilização de um meio de transferência de calor baseado em petróleo, o que restringe a temperatura de operação a 400°C, resultando em qualidade do vapor moderada e uma diminuição da eficiência da turbina de vapor. Adicionalmente, considera como desvantagem a disponibilidade de uma vasta área (terreno) para construção das usinas e a grande necessidade de água a ser utilizada no sistema.

1.2.2.2 Refletor Linear Fresnel (RLF)

Os coletores solares concentradores do tipo Refletor Linear de Fresnel (RLF) são compostos por refletores lineares instalados próximos ao solo e por receptores absorvedores localizados acima do campo solar, onde a radiação solar direta incidente é concentrada. A geometria dos coletores RLF pode variar entre os tipos planos, levemente esféricos ou levemente parabólicos, dispostos em filas paralelas. Cada refletor é controlado independentemente, acompanhando o movimento do sol através de um único eixo de rotação e refletindo a radiação solar para um único receptor linear suspenso e fixo no espaço acima dos refletores. O receptor absorvedor pode apresentar cavidades horizontal, vertical ou triangular. Tal como acontece com os sistemas de calhas parabólicas, é utilizado um fluido de transferência de calor para gerar vapor (EUSTÁQUIO, 2011; ZHU et al., 2014; PROCÓPIO et al., 2016). Uma representação simplificada do funcionamento de uma usina baseada na tecnologia heliotérmica RLF é apresentada na Figura 9.

Figura 9 - Esquema simplificado de uma central de RLF



Fonte: EUSTÁQUIO (2011, p. 15).

O uso de concentradores solares do tipo RLF é tido como uma ótima opção para a produção de calor de média e alta temperatura objetivando atender processos térmicos industriais. Trata-se de uma tecnologia de fácil construção, instalação e

manutenção, além de permitir o uso de água pressurizada nas fases líquida ou vapor como fluido de trabalho (PROCÓPIO et al., 2016).

Häberle (2013) explica o contexto histórico da tecnologia RLF com base em três importantes momentos: o princípio das lentes de Fresnel, criado Augustin Jean Fresnel no início do século XIX; o primeiro protótipo de um coletor Fresnel, elaborado por Giovanni Francia, em 1964; as construções das primeiras plantas piloto e comerciais baseadas na tecnologia RLF no fim dos anos 1990 e início dos anos 2000.

O princípio das lentes de Fresnel (ou lentes segmentadas), criado Augustin Jean Fresnel no início do século XIX, possibilitou a construção de lentes de grande abertura e curta distância focal sem o peso e volume do material (mais finas e permitindo a passagem de mais luz) que seriam necessários a uma lente convencional. Originalmente, as lentes Fresnel foram criadas para uso em faróis de sinalização marítima, sendo que os faróis com elas equipados eram visíveis a maiores distâncias que os existentes até então. Atualmente, essas lentes são encontradas em faróis de automóveis, semáforos, projetores, holofotes e, inclusive, em dispositivos que realizam identificação biométrica pela retina (EUSTÁQUIO, 2011; FELDHOFF, 2012).

Na década de 1960, Giovanni Francia, da Universidade de Genova, na Itália, realizou importantes desenvolvimentos em sistemas com lentes do tipo Fresnel, sendo que um deles utilizava refletores lineares Fresnel com o foco num único ponto. Esse sistema foi patenteado em 1964 (EUSTÁQUIO, 2011).

Somente após a publicação do relatório do Departamento de Energia dos Estados Unidos, em 1970, a respeito da tecnologia Fresnel, é que esta tecnologia começou a despertar interesse no mundo. Inicialmente, os primeiros projetos envolvendo RLF focaram na produção de calor a baixa temperatura, em torno de 180 °C a 300 °C com tubos não evacuados (ZHU et al., 2014).

Atualmente, existem poucas plantas solares com tecnologia RLF operando mundialmente e alguns projetos encontram-se em desenvolvimento. As seguintes plantas em operação são mencionadas por Feldhoff (2012):

- a) Solarmundo, em Liège, na Bélgica, sendo o primeiro projeto de usina solar com tecnologia RLF no mundo. Construção teve início em 1998 e a usina começou a operar em 2001, com área total construída de 2.400 m²;
- b) Fresdemo, em Almería, na Espanha. Projeto piloto que iniciou suas operações em 2007. Possui 100 metros de comprimento por 21 metro de largura, ocupando uma área total de pouco mais de 1,400 m². Formada por 1.200 facetas de espelhos organizadas em 25 filas paralelas. O coletor foi projetado para a geração de vapor direto a uma pressão máxima de 100 bar e o sistema atinge temperatura máxima de 450° Celsius;
- c) Liddell, Austrália. Projeto iniciado em 2008 e com operação a partir de 2012, com capacidade para geração de 9 MW de energia. Composto por quatro filas paralelas de espelhos com comprimento total de 403 metros. Projetada para atingir temperaturas de até 270 ° Celsius, ocupa uma área total de 18.490 m²;
- d) Puerto Errado-1, em Calasparra, Espanha. Em operação desde 2009, ocupa área total de 21.571 m². É composto por duas fileiras de espelhos com 16 metros de largura e 806 metros de comprimento. A capacidade de geração é de 1,4 MW, com temperaturas podendo chegar até 270° Celsius e operação a 55 bar;
- e) Puerto Errado-1, em Calasparra, Espanha. Essa extensão da PE-1 iniciou suas operações em 2012. Trata-se de um empreendimento que prevê capacidade de geração de 30 MW de energia. É composto por 28 linhas de espelhos com 16 metros de largura e 940 metros de comprimento, ocupando uma área total de 302.000 m²;
- f) Augustin Fresnel 1, na França. Projetada pelo grupo Solar Euromed, tratou-se de um projeto modesto que teve operações iniciadas em 2012. Ocupando uma área de 400 m², possui capacidade de geração de 0,25 MW;

Outro empreendimento que merece destaque é a usina solar térmica de Kimberlina, localizada em Bakersfield, na Califórnia, Estados Unidos da América. Kimberlina é tida como a primeira usina compacta do tipo RLF do continente americano e foi construída pela empresa Ausra em apenas sete meses (a construção teve início em março de 2008 e em outubro do mesmo ano a usina já estava operando). A geração é de 5 MW de eletricidade. Ocupa uma área de 25.988 m², com 3 linhas compostas por 10 espelhos cada, totalizando 385 metros de

comprimentos cada e 2 metros de largura. Opera num ciclo Rankine, podendo chegar a 300° Celsius e pressão de até 40 bar (NREL, 2014).

Por meio da Figura 10, é possível visualizar a usina RLF de Liège, na Bélgica (à esquerda – item A); os concentradores lineares Fresnel da usina Fresdemo, em Almería, Espanha (ao centro – item B) e, finalmente, a planta solar de Kimberlina, nos Estados Unidos da América (à direita – item C).

Figura 10 - Usinas RLF de Liège (Bélgica), Almería (Espanha) e Bakersfield (EUA)



Fonte: Adaptada de FELDHOFF (2012).

Os sistemas heliotérmicos baseados em RLF, quando comparados aos sistemas de calhas parabólicas, apresentam as seguintes vantagens: refletores primários instalados próximos ao solo, fator que influencia positivamente na resistência cargas de vento; o fato de usinas RLF requererem estruturas de sustentação e fundações mais leves e simples, o que impacta diretamente na facilidade de construção, produção e processamento, contribuindo para a redução dos custos, tornando a montagem da instalação mais simples; campos solares ocuparem menores áreas do solo, podendo ser, inclusive, instalados sobre telhados (BERMEJO et al., 2010; ZHU et al., 2014). Outra importante vantagem dos RLF deve-se ao fato do seu absorvedor não se movimentar, como ocorre nos sistemas de calhas parabólicas. Assim, esses sistemas demandam menos juntas móveis, o que possibilita a operação do fluido de trabalho com pressões mais elevadas e favorece a geração direta de vapor nos coletores, aumentando a eficiência global do sistema de geração de potência (POPOV, 2011).

Além das vantagens dos sistemas baseados em RLF já mencionadas, Eustáquio (2011) destaca que os espelhos planos são menos dispendiosos que os espelhos

parabólicos utilizados nas centrais de refletores parabólicos; que os refletores não necessitam suportar o tubo receptor e, por isso, podem ser mais simples em termos estruturais que os dos refletores parabólicos; e que esses sistemas oferecem um acesso mais fácil aos espelhos para se realizar a sua limpeza.

Apesar de todas as vantagens referentes à parte estrutural, simplicidade de construção, instalação, manutenção e posicionamento dos refletores próximos ao solo, os coletores do tipo RLF apresentam desvantagens como, por exemplo, o sombreamento no início da manhã e final da tarde, o que acarreta em uma produção de energia irregular em comparação com outras tecnologias CSP. Também existe o fato de que o rendimento ótico dos coletores RLF ser inferior aos dos coletores de calhas parabólicas, devido aos maiores ângulos de incidência transversais, o que acarreta maiores perdas de energia no processo (ZHU et al., 2014). Por fim, Eustáquio (2011) cita que outra desvantagem dos sistemas CSP baseados em RLF em relação aos demais é a questão das temperaturas obtidas não serem tão elevadas, fazendo com que a conversão de energia solar em energia elétrica seja mais baixa.

1.2.2.3 Discos parabólicos (*dish-stirling*)

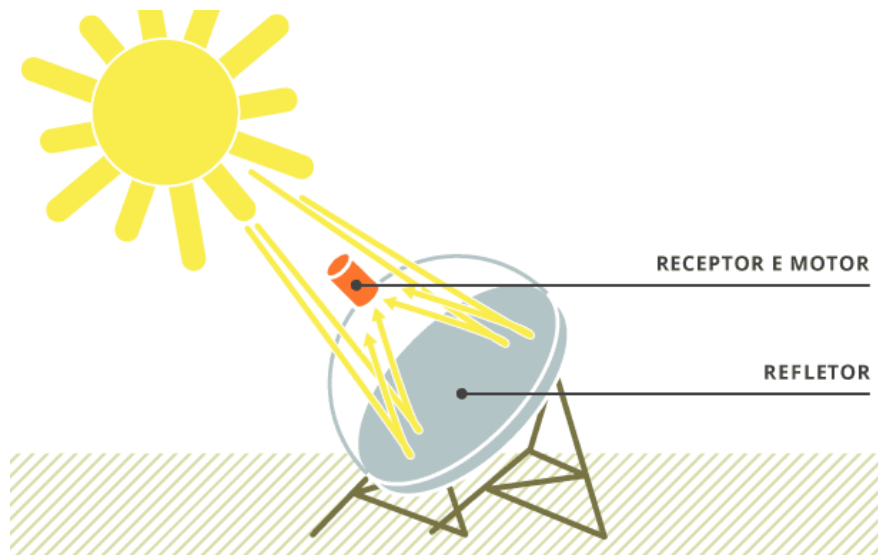
Sistemas CSP baseados na tecnologia de pratos parabólicos (*parabolic dishes* ou *dish stirling*) são constituídos por discos parabólicos de espelhos refletores dotados de um sistema de movimentação em dois eixos que focam a radiação concentrada em um receptor de cavidade. O calor gerado no receptor alimenta um motor/gerador, resultando em energia elétrica. O motor comumente utilizado nestes sistemas apresenta como vantagem o fato de sua eficiência na conversão de energia térmica para energia mecânica ficar acima de 40%. Os sistemas baseados em discos parabólicos apresentam elevadas temperaturas de operação (STINE; DIVER, 1994; MANCINI, 1997; EUSTÁQUIO, 2011). Ainda sobre as temperaturas alcançadas por esse tipo de sistema, Kalogirou (2009) cita que, por possuir uma concentração pontual e sistema de rastreamento em dois eixos, um disco parabólico possui altíssimas taxas de concentração e, conseqüentemente, permite atingir

altíssimas temperaturas, muitas vezes superiores a 1000°C ficando, neste quesito, atrás apenas da tecnologia de torre solar.

O prato atua como um concentrador e é o componente primário do sistema. Ele realiza a operação de coleta da radiação solar direta e concentra-a numa pequena área (receptor), de forma a atingir as temperaturas requeridas para converter o calor em trabalho. O receptor pode ser um motor *Stirling* ou um depósito localizado no ponto de focagem da parábola (SILVA, 2013).

Em resumo, um refletor em formato de disco parabólico concentra a radiação solar direta em um receptor localizado no ponto focal do espelho parabólico, como mostrado na Figura 11. O feixe de radiação é absorvido pelo receptor para aquecer um fluido a altíssimas temperaturas. Normalmente, o fluido de transferência de calor para o motor é hidrogênio ou hélio. O calor desse fluido é, então, utilizado num motor ou numa microturbina localizada no receptor.

Figura 11 - Esquema de operação de um disco parabólico



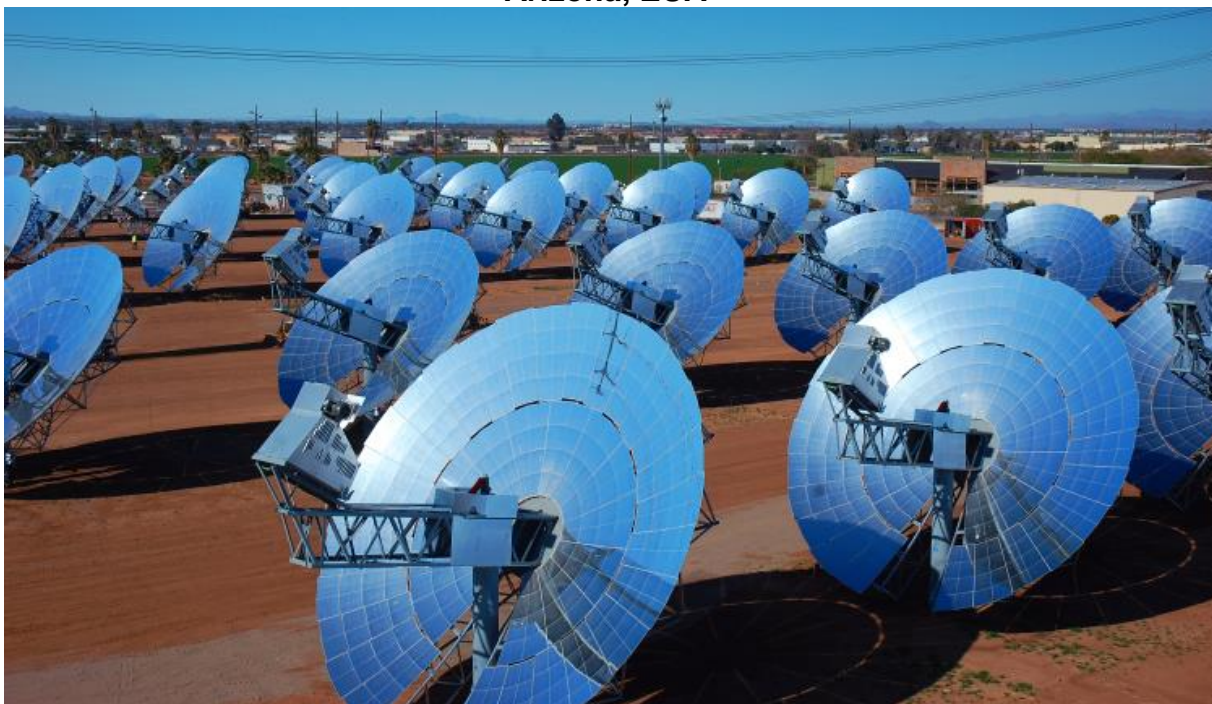
Fonte: ENERGIA HELIOTÉRMICA (2016).

Ainda em relação ao disco, este pode operar de forma independente ou como parte de uma planta composta por vários discos. Os raios solares incidem sobre a parábola e são concentrados no ponto focal da parábola, onde aquecem o fluido circulante. O calor pode ser usado de duas maneiras: ser transportado por tubulação para um sistema central; ou ser transformado diretamente em eletricidade em um

gerador acoplado diretamente no receptor. O mais comum é que o gerador opere de acordo com o ciclo *Stirling*, apesar de existirem outras configurações possíveis (KALOGIROU, 2009).

Os sistemas de disco *Stirling* já vêm sendo utilizados há algumas décadas. Em janeiro de 2008, o disco da *Stirling Energy System* (SES) alcançou 31,25% de eficiência de conversão de energia solar em eletricidade. Em janeiro de 2011, começou a operar a central Maricopa Solar, no Arizona, EUA, tido como o primeiro projeto comercial a utilizar esta tecnologia CSP. Conforme apresentado na Figura 12, a instalação utiliza 60 discos Stirling com 25 kW de potência cada, num total de 1,5 MW de capacidade de geração de eletricidade. Apesar da pequena contribuição da tecnologia de pratos parabólicos em projetos CSP, a central desenvolvida pelas empresas Tesseract Solar e SES é vista como um teste inicial aos projetos de centrais de 1.500 MW que devem ser iniciados nos próximos anos nos estados da Califórnia e do Texas (EUSTÁQUIO, 2011; BUCK et al., 2014).

Figura 12 - Discos parabólicos da central heliotérmica Maricopa Solar, no Arizona, EUA



Fonte: EUSTÁQUIO (2011, p. 18).

São tidas como as principais vantagens dos sistemas de discos parabólicos: o fato de os espelhos poderem ser facilmente limpos e apresentarem uma vida útil elevada em ambiente externo; o prato parabólico ter a mais elevada eficiência de conversão solar-elétrica de todos os sistemas CSP, atingindo taxas acima 30%; e a modularidade do sistema, que permite a sua utilização individual para aplicações remotas ou agrupada para alimentar pequenos aglomerados populacionais (SILVA, 2013).

No entanto, apesar deste sistema já ter demonstrado com sucesso que pode produzir eletricidade durante longos períodos de tempo, a barreira mais impactante para sua adoção e implementação é o custo: o custo por unidade de energia ainda é superior à outras tecnologias CSP, como os concentradores parabólicos lineares e a torre solar. Também, os motores *Stirling* representam um custo alto para garantir uma elevada fiabilidade e requerem manutenção constante (SILVA, 2013).

Eustáquio (2011) destaca que a falta de uma indústria de motores *Stirling* e o custo de produção dos discos são os fatores que mais comprometem a comercialização desta tecnologia heliotérmica.

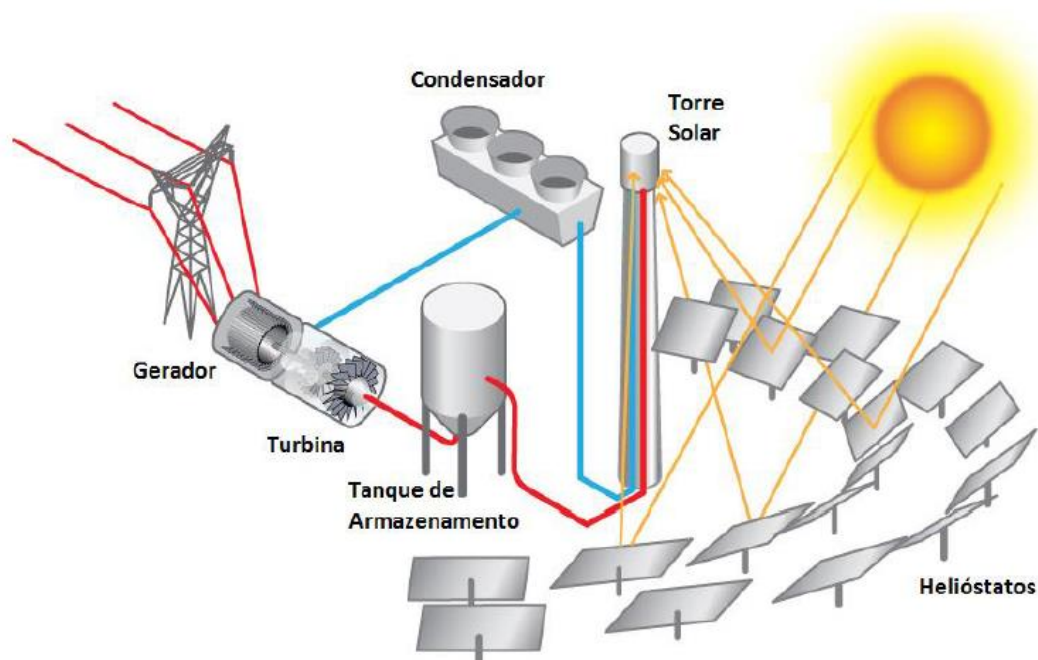
Outro ponto a considerar como desvantagem é a questão deste sistema não ter capacidade de armazenagem térmica (SILVA, 2013). A única opção que se coloca atualmente é a utilização de armazenamento elétrico através de baterias (EUSTÁQUIO, 2011).

1.2.2.4 Torre solar

Usinas termossolares em torre consistem de um campo de heliostatos (dispositivo que segue o movimento do Sol e que utiliza habitualmente um espelho ou conjunto de espelhos que podem ser orientados ao longo do dia através de um eixo fixo de modo a redirecionar a luz solar para um receptor estacionário) que se movem independentemente e de um concentrador localizado no topo de uma torre. Cada heliostato se move de forma a refletir os raios solares ao concentrador. O concentrador consiste de um feixe tubular por onde circula um fluido térmico, que é aquecido pela insolação refletida (EPE, 2012).

Segundo Silva (2013), no sistema baseado em torre solar, existe um conjunto de heliostatos (superfícies espelhadas que seguem o Sol) que atuam como coletores solares, concentrando a radiação solar num receptor central localizado no topo da torre. A torre central é um permutador de calor (receptor), onde a energia é transferida para um fluido térmico. Este é, opcionalmente, armazenado e finalmente passado para um sistema de conversão da energia térmica em elétrica, através do ciclo de vapor, como pode-se observar na Figura 13.

Figura 13 - Esquema de funcionamento de um sistema baseado em torre solar central



Fonte: SILVA (2013, p. 16).

De acordo com Buck et al. (2014), a estrutura básica de uma planta solar-térmica baseada em tecnologia de torre central inclui os seguintes componentes:

- a) Campo de heliostatos que se movem por meio de dois eixos com a finalidade de coletar e refletir a radiação solar no receptor central. Os heliostatos são constituídos de uma ou várias superfícies refletoras (espelhos);
- b) Receptor, onde a radiação solar é concentrada, absorvida e convertida em calor. O calor absorvido é transferido para um fluido de transferência de calor (*Heat Transfer Fluid* - HTF), podendo este ser água, vapor, sal fundido ou ar e

será aquecido a temperaturas a altíssimas temperaturas. A maioria dos receptores utiliza tubos metálicos, irradiados a partir do exterior, com o fluido de transferência de calor que passa através do tubo. Os materiais cerâmicos são normalmente utilizados para temperaturas superiores a 500 ° C;

- c) Torre: em seu topo fica posicionado o receptor;
- d) Armazenamento térmico: Sistemas sensíveis ou latentes de armazenamento de calor pode ser aplicados; durante a operação solar, o armazenamento é carregado pelo sistema de coleta de energia solar de grandes dimensões; quando a energia solar recolhida é inexistente ou insuficiente, o armazenamento pode ser descarregado para alimentar o ciclo térmico para a produção de eletricidade.
- e) Bloco de potência, similar ao de usinas termoelétricas convencionais, baseado em ciclo Rankine ou vapor superaquecido. Seu design é adaptado às condições específicas de operação do sistema. Técnicas de arrefecimento com ou sem utilização de água ou híbridas são aplicadas.

A fim de se atingir temperaturas elevadas, são necessárias extensas superfícies de coleta de radiação solar. Seria uma dificuldade de execução praticamente insuperável fazer o espelho coletor em uma única peça. Conseqüentemente, contornou-se essa dificuldade subdividindo os refletores em espelhos menores, cada um dos dotados de servomecanismos independentes que os mantêm constantemente orientados para o sol (COMETTA, 1982).

O campo de heliostatos é, em termos econômicos, o elemento mais importante destas centrais. Os heliostatos possuem um sistema de seguimento em dois eixos e áreas espelhadas que podem chegar aos 150 m². O campo de heliostatos tem, normalmente, um layout similar a um círculo e grandes usinas de energia são normalmente construídos com campos circulares, ou seja, com os heliostatos em torno da torre. As temperaturas podem variar desde algumas centenas de graus Celsius até 1000 °C. A radiação solar é absorvida por um fluido de transferência de calor no receptor e a jusante deste é utilizada ou gerada vapor para alimentar uma turbina convencional (EUSTÁQUIO, 2011; BUCK et al., 2014).

A torre central é um permutador de calor (receptor), onde a energia é transferida para um fluido de transferência de calor. O receptor é uma estrutura porosa que atua

como absorvedor de energia. É habitualmente posicionado dentro de uma cavidade dentro da torre. O ar dentro da estrutura movimenta o calor através de um permutador de tubos. Já o fluido térmico pode ser água/vapor, nitrato de sal fundido, metais líquidos ou ar (SILVA, 2013).

Opcionalmente, estas centrais podem ter um sistema de armazenamento térmico para os períodos em que não há radiação solar disponível, ou seja, em período noturnos e dias encobertos (EUSTÁQUIO, 2011).

O grande benefício das centrais heliotérmicas reside na substituição da eletricidade gerada a partir de combustíveis fósseis e na consequente atenuação dos possíveis impactos da emissão de dióxido de carbono sobre as mudanças climáticas. Como um benefício adicional, as centrais heliotérmicas oferecem maior segurança energética, uma vez que a tecnologia não sofre influência direta de flutuações no preço e de incertezas no suprimento de combustíveis fósseis (WENDEL et al., 2010).

Buck et al. (2014) citam as principais vantagens de sistemas heliotérmicos baseados em torre central em comparação a outras tecnologias de CSP, sendo:

- a) É possível se atingir maiores temperaturas no receptor e, conseqüentemente, no armazenamento;
- b) Os ciclos de potência mais eficientes, devido aos parâmetros de processo mais elevados;
- c) Maiores espalhamentos de temperatura no armazenamento;
- d) A produção anual de energia é mais homogênea;
- e) O campo de heliostatos não exige um extenso trabalho de preparação da terra, podendo até mesmo ser construído em terrenos com leve inclinação;

As desvantagens estão relacionadas à intensidade do brilho produzido pela torre central, que pode vir a interferir, por exemplo, no tráfego aéreo ou mesmo o brilho do receptor será visível a longas distâncias; ao excessivo uso de água para manter os heliostatos limpos e à necessidade de utilização de uma vasta área (terreno) por parte do empreendimento, principalmente no que se refere ao campo de heliostatos (BUCK et al., 2014).

A Tabela 2 apresenta um resumo das principais informações sobre cada uma das usinas CSP de torre central atualmente em operação no mundo (NREL, 2016b).

Tabela 2 - Usinas CSP de torre central em operação

Usina	Local	Nº. de heliostatos	Área utilizada (m ²)	Potência instalada (MW)	Armazenamento
ACME Solar Tower	Bikaner, Índia	14.280	16.222	2,5	-
Crescent Dunes Solar Energy Project	Tonopah, EUA	10.347	1.197.148	110	10 horas
Dahan Power Plant (Yanqing Solar Power Station)	Beijing, China	100	10.000	1	1 hora
Gemasolar Thermosolar Plant	Andalucía, Espanha	2.650	304.750	19,9	15 horas
Greenway CSP Mersin Tower Plant	Mersin, Turquia	510	Informação indisponível	1,4	-
Ivanpah Solar Electric Generating System (ISEGS)	Primm, EUA	173.500	2.600.000	392	-
Jemalong Solar Thermal Station	Jemalong, Austrália	3.500	15.000	1,1	3 horas
Jülich Solar Tower	Jülich, Alemanha	2.153	17.650	1,5	1,5 horas
Khi Solar One	Upington, África do Sul	4.120	576.800	50	2 horas
Lake Cargelligo	Lake Cargelligo, Austrália	620	6.080	3	-
Planta Solar 10 (PS10)	Sevilla, Espanha	624	75.000	11	1 hora
Planta Solar 20 (PS20)	Sevilla, Espanha	1.255	150.000	20	1 hora
Sierra SunTower	Lancaster, EUA	24.360	27.670	5	-

Fonte: NREL (2016b).

Neste cenário, merecem destaques os empreendimentos PS10 e PS20, localizados em Sanlúcar la Mayor, Sevilla, Espanha. De fato, a PS10 é tida como a primeira central solar termoelétrica de torre com finalidade comercial instalada no mundo, em 2007. Trata-se da primeira de um conjunto de plantas solares que deverá construído para alcançar uma produção total de 300 MW, suficiente para

abastecer 180.000 moradias ou toda a cidade de Sevilla e evitar a emissão de 600.000 toneladas de CO₂ na atmosfera.

O maior empreendimento CSP do tipo torre solar do mundo é, atualmente, a *Ivanpah Solar Electric Generating System*, localizada no deserto de Ivanpah, Califórnia, EUA. Oficialmente inaugurada em fevereiro/2014, o complexo de usinas apresentado na Figura 14 é formado por mais de 173.000 heliostatos com dois espelhos cada e suas torres possuem altura de aproximadamente 140 metros.

Figura 14 - Complexo de usinas CSP de torre central em Ivanpah, EUA



Fonte: NREL (2016b).

Além das plantas solares listadas pelo *National Renewable Energy Laboratory* e da compilação de informações apresentadas na Tabela 3, acrescenta-se a usina *AORA Solar Tulip Tower*, localizada em Almería, na Espanha. Em operação desde abril de 2012, trata-se de um empreendimento voltado à pesquisa e desenvolvimento da tecnologia de torre e com potência instalada de 0,10 MW (100 kW).

Os projetos envolvendo a tecnologia CSP de torre solar que estão em construção são listados na Tabela 3 (NREL, 2016b).

Tabela 3 - Usinas CSP de torre central em fase de construção

Usina	Local	Nº. de heliostatos	Área utilizada (m ²)	Potência instalada (MW)	Armazenamento
Ashalim Plot B (Megalim)	Ashalim, Israel	50.600	1.052.480	121	-
Atacama-1	Calama, Chile	10.600	1.484.000	110	17,5 horas
Copiapó	Copiapó, Chile	Informação indisponível	Informação indisponível	260	14 horas
Golmud	Golmud, China	Informação indisponível	Informação indisponível	200	15 horas
NOOR III	Ouarzazate, Marrocos	Informação indisponível	Informação indisponível	150	8 horas
Qinghai Delingha Solar Thermal Generation Project	Delingha, China	Informação indisponível	Informação indisponível	270	3,5 horas
Redstone Solar Thermal Power Plant	Postmasburg, África do Sul	Informação indisponível	Informação indisponível	100	2 horas
Sundrop CSP Project	Port Augusta, Austrália	23.000	51.500	1,5	-
Supcon Solar Project	Delingha, China	217.440	434.880	20	2,5 horas

Fonte: NREL (2016b).

No Brasil, destaca-se o projeto SMILE – Sistemas de Microturbina solar-híbrida para cogeração de Eletricidade e calor para o setor agroindustrial. O projeto prevê a construção de duas plantas CSP de torre central, sendo uma na cidade de Caiçara do Rio do Vento/RN (latitude: -5,76°; longitude: -36°; altitude: 175 m) e outra na cidade de Pirassununga/SP (latitude: -21,9°; longitude: -47,42°; altitude: 627 m). A planta de Caiçara do Rio do Vento/RN objetiva a geração de 100 kW elétricos e potência térmica suficiente para processar a produção de 500 vacas leiteiras em um laticínio. A altura projetada da torre solar é de 23 metros e o campo solar deverá ser formado por cerca de 50 heliostatos com superfícies refletoras de 3,21 metros de comprimento x 2,5 metros de largura, instaladas à 1,65 metros do chão. No caso da planta piloto de Pirassununga/SP, esta seria localizada dentro do campus da Universidade de São Paulo (USP) e o projeto prevê a geração de 100kW de energia elétrica para suprir as necessidades do frigorífico-escola, atualmente usado pela suinocultura. O calor gerado pelo sistema poderá ser utilizado para esterilização dos equipamentos. O projeto SMILE é uma cooperação entre as instituições Solinova Inovação Tecnológica e Empresarial Ltda.; *Deutschen Zentrums für Luft- und*

Raumfahrt (DLR); e Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA/USP), campus Pirassununga (SOLINOVA, 2013).

1.2.3 Heliostato

O significado da palavra heliostato está relacionado ao termo “helio”, do grego *Hélios*, que significa sol e “stato”, pelo fato de que a imagem do sol refletida é mantida num ponto fixo no decorrer do dia. Um heliostato é um dispositivo que segue o movimento do sol. Utiliza, habitualmente, um espelho ou vários módulos espelhados que é/são orientado(s) ao longo do dia através de eixos, rastreando o sol e recolhendo e concentrando a radiação solar em um para um receptor estacionário (BUCK et al., 2014; HOFFSCHMIDT et al., 2012; EPE, 2012).

Heliostatos são superfícies refletoras munidas de um sistema de rastreamento em dois eixos que assegura que a radiação solar direta seja refletida num dado ponto. A luz solar é refletida por meio de superfícies levemente curvadas, de modo que a densidade do fluxo de radiação é aumentada no concentrador (KALTSCHMITT et al., 2007).

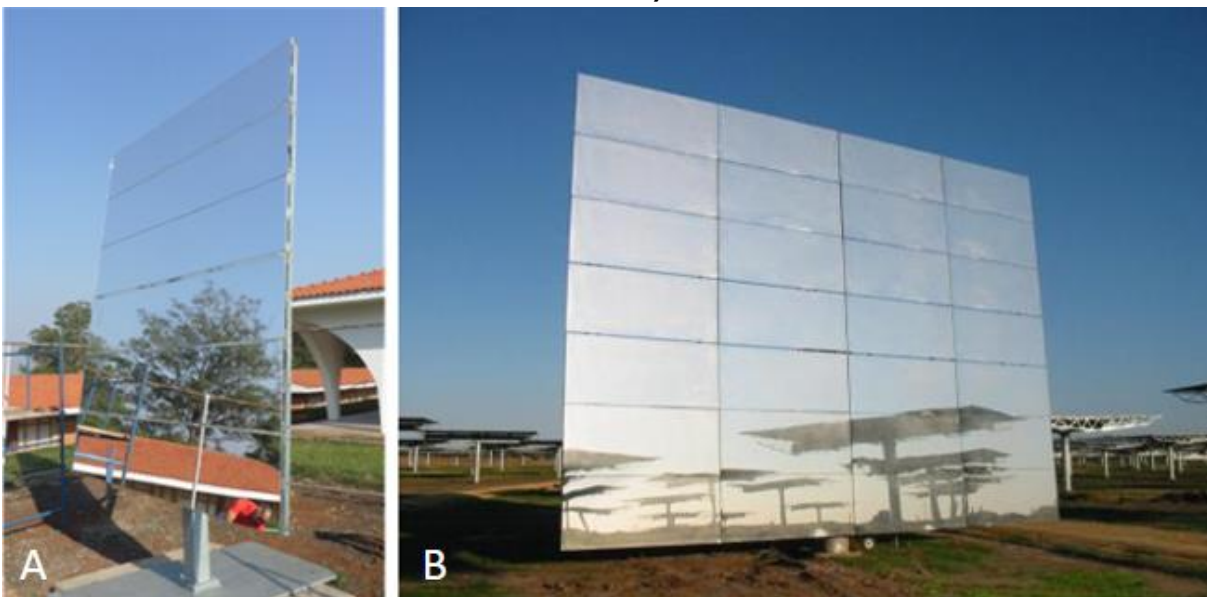
Os heliostatos podem apresentar pequenas ou grandes dimensões, com poucos metros quadrados de área, no caso dos pequenos, até um conjunto de superfícies espelhadas entre 60 e 150 m², no caso dos grandes (EUSTÁQUIO, 2011). A Figura 15 apresenta ambos os tipos de heliostatos: o da esquerda (item A) possui 8m² de área e foi construído durante o projeto I-NoPa (Inovação e Novas Parcerias), em 2014. Atualmente, está situado no campus da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, em Botucatu (FCA/Unesp/Botucatu), no departamento de Engenharia Rural. O heliostato mostrado à direita (item B) refere-se a um dos dispositivos que compõem a PS10, em Sevilha, na Espanha. Trata-se de um heliostato composto por 28 facetas de espelho e com área total de 120 m² (modelo Abengoa-Solucar 120).

O aumento das dimensões dos heliostatos levaria a uma diminuição total dos sistemas de rastreamento solar, reduzindo o custo por m². Uma vez que esses sistemas representam uma parte importante dos custos do campo solar, heliostatos

com dimensões maiores representariam uma redução de 7% nos custos dos projetos envolvendo torres solares (ATKEARNEY, 2010).

No entanto, Buck et al. (2014) citam que as dimensões ideais para um heliostato dependerão de variáveis como a taxa de produção de energia esperada por parte da usina; o tipo de solo e da fundação a ser usada; e do custo de seus diferentes componentes. Estruturas de suporte para espelhos pequenos são vantajosas devido ao seu menor peso, sendo esta a principal unidade de medida para o custo, especialmente para altas taxas de produção. Todavia, heliostatos com maiores dimensões têm a vantagem de necessitarem de menos fundações, fiação e unidades de controle.

Figura 15 - Diferentes dimensões de heliostatos (modelo de 8m² e modelo de 120 m²)



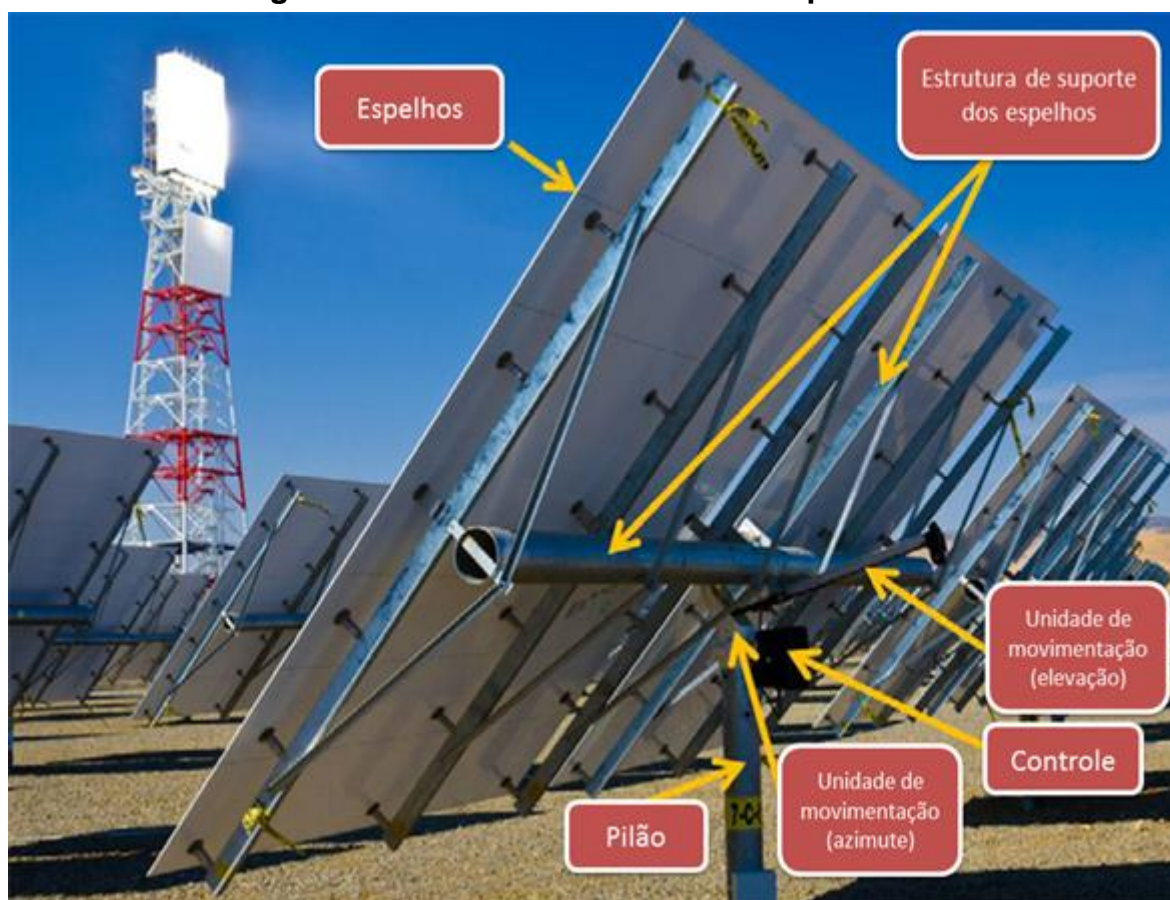
Fonte: Elaborada pelo autor e BUCK et al. (2014).

Heliostatos são considerados os elementos mais impactantes no custo de instalação de uma usina solar térmica de torre central, pois representam entre 40% e 50% do custo total da planta (KOLB et al., 2007). O custo do heliostato depende de suas dimensões. Porém, os materiais, os requisitos para a performance e a configuração são os mesmos para todos heliostatos (BLACKMON, 2013). Além disso, a utilização de heliostatos adequados pode gerar reduções de até 40% nas perdas de energia no sistema (KOLB et al., 2007). O termo "heliostato adequado" diz

respeito ao tamanho, às configurações do espelho, às reduções de cargas operacionais e a resistência à carga de vento (COVENTRY; PYE, 2014). Normalmente, os critérios da concepção de heliostato dependem das condições ambientais do local do empreendimento (PFAHL et al., 2013). Assim, o projeto e o processo de otimização do heliostato têm uma grande importância em projetos de usinas solares com torre.

Os principais componentes de um heliostato são: o espelho ou conjunto de espelhos (normalmente de vidro e metal), a estrutura de suporte e o sistema de rastreamento solar com movimento em eixos (EUSTÁQUIO, 2011). Por meio da Figura 16, observa-se, além dos componentes citados, o pilão de sustentação e as unidades de movimentação (*drives*).

Figura 16 - Um heliostato e seus componentes



Fonte: BUCK et al. (2014, p. 20).

Os heliostatos podem ser formados por um ou vários espelhos ou mesmo por qualquer outro tipo de superfície capaz de refletir a luz solar (KALTSCHMITT et al., 2007).

Em relação ao material das superfícies refletoras, Buck et al. (2014) destacam que, atualmente, é comum a utilização de espelhos de vidro com fundo prateado, devido à sua estabilidade contra a degradação por parte de variáveis ambientais. Espelhos de vidro finos (~ 1 mm) fornecem maior refletividade, porém exigem uma estrutura adicional de suporte. Espelhos de vidros mais grossos (~ 4 mm) são autossustentáveis e podem ser fixados por apenas alguns pontos. Folhas de alumínio e películas poliméricas metalizadas são materiais alternativos. Porém, possuem desvantagens, como níveis de refletividade mais baixos e a necessidade de revestimento adicional contra a abrasão por areia ou outras variáveis naturais. A limpeza também torna-se mais difícil. Muitas vezes a redução do custo do material das superfícies refletoras não é compensatória, devido a taxa de perda de refletividade.

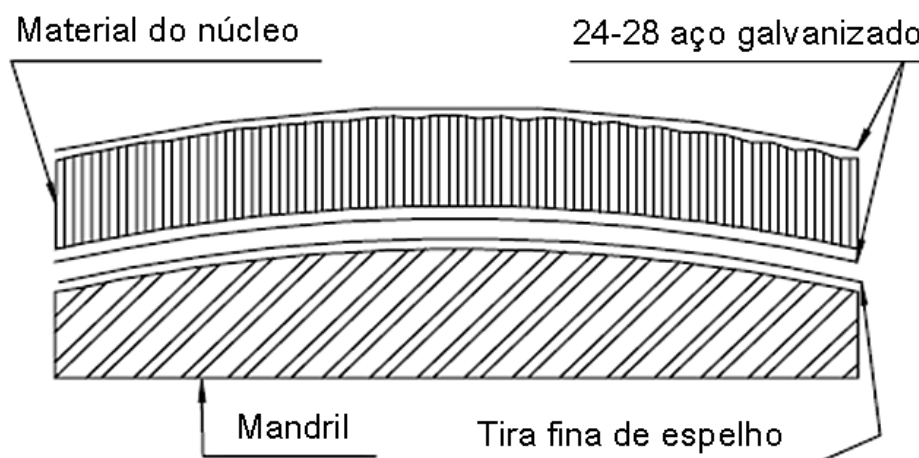
Ainda sobre os materiais utilizados, Pitz-Paal (2010) cita que as superfícies dos heliostatos mais modernos são compostas de vidro espelhado fino, com baixo teor de ferro, para uma maior refletividade, maior resistência à oxidação e, conseqüentemente, maior durabilidade. Usualmente, são utilizados espelhos com 3 até 4 mm de espessura. Componentes como o alumínio e os revestimentos poliméricos ainda não demonstraram ter capacidade para durarem de 20 a 25 anos, tempo de vida necessário para serem viáveis numa usina CSP de torre central.

Recentemente, o uso de facetas-sanduíche tem atingido alto índice de eficiência em sistemas CSP de torre central, em razão de suas excelentes propriedades ópticas. Essas estruturas são formadas por membranas, como chapas de aço ou plástico, posicionadas e conectadas em frente e atrás do elemento central (estrutura similar a de um sanduíche). Para os elementos ópticos solares, um espelho é ligado às membranas (DIVER; GROSSMAN, 1998).

A Figura 17 apresenta um diagrama esquemático ilustrando a construção de uma faceta-sanduíche. Ela consiste de um espelho de vidro ligada a uma folha de aço-carbono, um material do núcleo e uma outra membrana de aço-carbono com o mesmo calibre que a membrana da frente. Neste exemplo, as chapas de aço-

carbono eletro galvanizadas são de baixo custo, proporcionam resistência à corrosão e melhoraram a adesão. Facetas com este tipo de construção laminada, ou seja, onde os espelhos estão ligados a uma camada impermeável com uma fita de transferência do adesivo, demonstraram excelente durabilidade no campo (DIVER; GROSSMAN, 1998). Observa-se, ainda, que as chapas de aço e o material do núcleo são colados sobre um mandril (uma espécie de forma) da curvatura desejada, o que influenciará a distância focal.

Figura 17 - Exemplo de formação de uma faceta-sanduíche



Fonte: Adaptado de DIVER; GROSSMAN (1998, p. 2).

O uso de facetas-sanduíche tem se mostrado vantajoso pelo fato de utilizar espelhos de fina espessura (cerca de 1mm); apresentarem taxa de refletividade 2% maior em comparação a outros tipos de superfícies refletoras e o peso total da estrutura ser reduzido. Além disso, a precisão da forma e sua rigidez são altas e o índice de quebra de espelhos tem se mostrado muito baixo (BUCK et al., 2014). As facetas-sanduíche ainda não estão disponíveis no Brasil (PFAHL et al., 2015a). Inclusive, o heliostato construído durante o projeto I-NoPa/CEISA fez uso de uma espelhos de 4mm de espessura colados em tiras de vidros em substituição às facetas sanduíches. Especificamente neste projeto, a tira composta pelo vidro e espelho se mostrou rígida suficiente para resistir à tensão nos conectores mais externos e flexível para proporcionar a altura de curvatura da parábola desejada (BEZERRA et al., 2015).

Para fixação dos espelhos na estrutura metálica do heliostato, acolchoamentos de cerâmica com a mesma taxa de expansão térmica do vidro são colados nos espelhos. Esses são conectados na estrutura de suporte por elementos flexíveis que compensam as diferenças de expansão térmicas dos vidros dos espelhos e da estrutura de aço que os suportam. Os blocos acolchoados devem ser montados de forma ligeiramente rotativa para assegurar que nenhuma tensão adicional do vidro seja causada pelas almofadas, o que iria aumentar o risco de ruptura (BUCK et al., 2014).

Existem diferentes opções de configurações para a orientação da rotação dos eixos de heliostatos. No caso de heliostatos conhecidos como "azimute-elevação", as espelhos são girados em torno do eixo vertical primário para, assim, seguirem o movimento azimutal do sol. As superfícies espelhadas são montados sobre um tubo que roda em torno do eixo horizontal secundário para seguir a elevação do sol durante o dia. O pilão vertical e o tubo horizontal formam um "T". Assim, este tipo de heliostato é, muitas vezes, chamado de "tipo T", conforme ilustra a Figura 18 (BUCK et al., 2014).

Figura 18 - Heliostato do tipo "T", com eixo de orientação azimute-elevação



Fonte: Adaptado de BUCK et al. (2014, p. 21).

Nota-se que, nos heliostatos do tipo "T", os espelhos são montados sobre um tubo que gira em torno do eixo horizontal secundário para seguir a elevação do sol. Existe uma outra forma que utiliza o eixo horizontal primário. Com essa configuração, os heliostatos podem ser posicionados no campo mais próximos uns dos outros porque eles não giram em torno do eixo vertical. Assim, a principal vantagem deste conceito é a possibilidade de utilizar unidades lineares (*linear drives*) ou movimentação em arcos (*rim drives*), que serão explicadas a seguir (BUCK et al., 2014).

O sistema de movimentação utiliza motores e controles eletrônicos. A orientação individual de um heliostato é calculada com base em sua posição, a posição do sol num dado momento e a localização do ponto de concentração. A localização do alvo é informada eletronicamente para os respectivos motores de movimentação via linhas de comunicação. Essa informação é atualizada em intervalos de poucos segundos (KALTSCHMITT et al., 2007).

Como mencionado, os sistemas de movimentação, rotação dos eixos e rastreamento da posição solar são componentes primordiais de um heliostato. Neste sentido, Buck et al. (2014) destacam as seguintes unidades de movimentação: *slew drives* (giro); *linear drivers* (movimentação linear); *rim drives* (movimentação por aros); e *hydraulic drives* (movimentação hidráulica).

Os *drives* de giro (*slew drives*) são comumente utilizados para que o heliostato acompanhe o movimento azimutal do sol. Eles travam automaticamente, são precisos e permitem deslocamento em 360 graus. Todavia, possuem alto custo de construção e manutenção. Para que o heliostato acompanhe o movimento de elevação solar, normalmente unidades lineares (*linear drives*) são usadas, por se tratar de uma opção de baixo custo (BUCK et al., 2014). A Figura 19 apresenta um heliostato com sistema de movimentação composto por dois *drives* lineares e com superfícies refletoras montadas sobre um tubo que gira em torno do eixo horizontal primário para seguir a elevação do sol.

Em busca de reduzir o custo de produção dos heliostatos, Pfahl et al. (2013) desenvolveram um novo conceito baseado em movimentação por aros nos eixos horizontal e vertical. As partes de movimentação possuem peso equilibrado, o que acarreta em um baixo consumo de energia. Isto foi alcançado apenas por via das

unidades de aros atuando como contra peso. Os questionamentos de Pfahl et al. (2013) voltaram-se ao fato de os *drives* de movimentação convencionais serem colocados sempre perto demais dos eixos de rotação. Esta configuração exige alta precisão por parte das unidades que movimentam os heliostatos. Nas palavras do próprio autor principal: "Imagine posicionar a maçaneta de uma porta perto da dobradiça em vez de colocá-lo (como normalmente é) na outra ponta, onde a porta é mais fácil de controlar". Assim, ao posicionar as unidades de movimentação perto das bordas do heliostato, é possível aumentar significativamente a potência de alavanca, reduzir a carga e a precisão necessária da unidade. Por meio da utilização de um software de *ray tracing* (estudo sobre o comportamento de um dados sistema por meio da simulação da incidência de raios solares sobre o mesmo) fornecido por DLR, provou-se que este tipo de heliostato é adequado para todas as situações possíveis dentro de um campo heliostatos.

Figura 19 - Heliostato com duas unidades lineares e movimentação no eixo horizontal primário



Fonte: Adaptado de BUCK et al. (2014, p. 23).

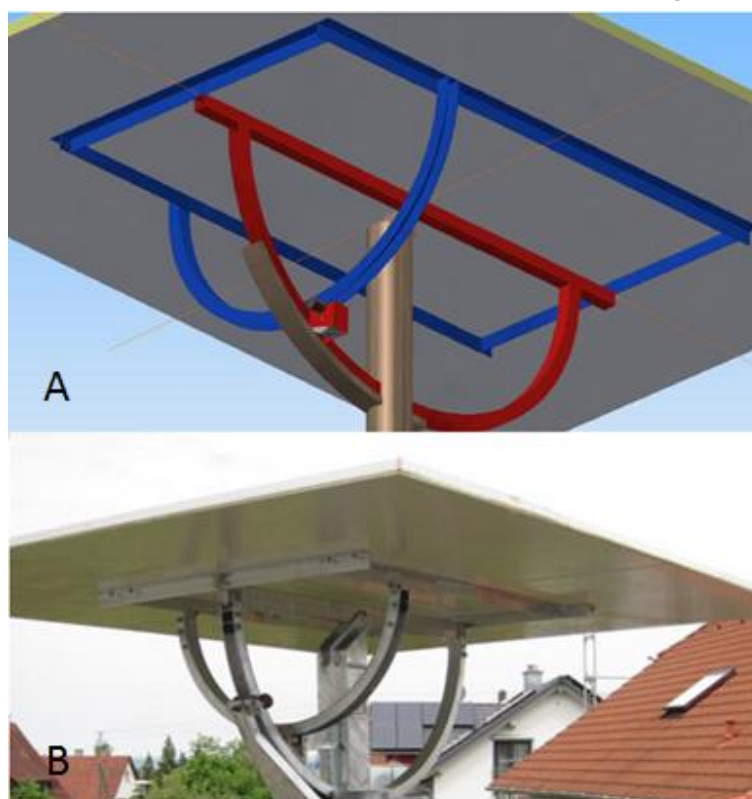
A estrutura de movimentação baseada em aros mostra-se simples e barata, onde engrenagens de baixa precisão pode ser usadas. Os aros podem ser

acionados por meio de correntes, roldanas de tração ou simplesmente por rodas guiadas (BUCK et al., 2014).

Compreende-se, através da Figura 20, que aplicação de aros nos dois eixos faz a interface de ligação entre o pilão de sustentação e a moldura que sustenta o espelho. Os aros destacados no item A da referida Figura são responsáveis por permitir que o heliostato se movimente nos eixos horizontal e vertical, possibilitando o rastreamento do movimento do sol através de um simples, porém preciso sistema de movimentação que faz uso de cabos e manivela de alta eficiência. O rastreamento preciso é alcançado em razão do grande diâmetro dos aros, evidenciados no item B da Figura 20, o que também permite que engrenagens e motores de baixo custo possam ser utilizadas.

O heliostato construído durante o projeto I-NoPa/CEISA faz uso do conceito proposto por Pfahl et al. (2013).

Figura 20 - Heliostato com sistema de movimentação em arcos



Fonte: Adaptado de PFAHL et al. (2013).

Unidades hidráulicas de movimentação surgem como uma promessa de solução de baixo custo para heliostatos de grandes dimensões. Um estudo realizado por Buck et al. (2014) sugeriu que elas podem ser utilizadas para realizar o acompanhamento do movimento solar azimutal. Porém, um mecanismo extra para transformar o movimento linear em rotacional seria necessário para atingir o intervalo de ângulos requerido em heliostatos do tipo "T".

Em relação às variáveis climáticas, faz-se importante lembrar que os heliostatos ficam expostos não somente ao sol, mas também ao vento. O *layout* da fundação, sua estrutura e os sistemas de movimentação devem ser projetados para resistirem à máxima carga de vento que possa ocorrer. Para condições de tempestades, os espelhos devem ser colocados em posição horizontal (*stow position* ou posição de guarda), de modo a sofrerem a menor carga de vento possível. Essa movimentação deve ser rápida o suficiente no caso de aumento da velocidade do vento (antes de atingir um valor crítico). Um valor típico para a velocidade desse movimento é de 9°/minuto (BUCK et al., 2014). Estudos e investigações sobre a dinâmica das cargas de vento devem ajudar a reduzir os efeitos das mesmas na vida útil dos heliostatos. Por exemplo, estão sendo estudados o uso de amortecedores ou *spoilers* de diferentes tipos para tal (PHFAL et al., 2013).

Além disso, a capacidade de suportar o granizo é importante pra qualquer superfície exposta ao ambiente externo. No caso do espelhos, um critério típico adotado seria resistir a pedras de 19 mm colidindo a uma velocidade de 20 m/s (STINE; GEYER, 2001).

Outra questão a ser considerada é o *defocus* (ou desfocagem), ou seja, em caso de algum problema, o heliostato deve ser capaz de alterar seu ponto focal rapidamente, para evitar o sobreaquecimento do receptor (BUCK et al., 2014). Enfatiza-se que o termo desfocagem pode, outras vezes, referir-se às perdas, tanto do receptor quanto dos heliostatos, em relação à dimensão da superfície absorvedora, da focagem da radiação e da distância à torre). A perda por desfocagem significa que energia direcionada ao receptor não atinge a superfície absorvedora. Nem sempre essa perda é proposital, ou seja, ocorre em caso de algum evento emergencial, como destacado. A precisão da superfície dos espelhos, a propagação do feixe de radiação, a precisão do alinhamento dos espelhos e do

sistema de seguimento têm um grande efeito sobre a distribuição do fluxo no receptor e, conseqüentemente, na desfocagem (EUSTÁQUIO, 2011).

Em resumo, compreende-se que os heliostatos são refletores que irão direcionar a radiação solar até o receptor central localizado no topo da torre. Assim, eles necessitam ser orientados com muita precisão e as superfícies refletoras (espelhos) devem apresentar alta taxa de refletividade e, também, durabilidade. Um correto planejamento dos componentes necessários para construção e diminuição dos custos de produção destes dispositivos é essencial para que a tecnologia de torre central torne-se competitiva.

1.2.4 Soiling (acúmulo de sujeira em superfícies espelhadas) e métodos de limpeza

Para que uma usina CSP de torre central tire o máximo de proveito da radiação solar direta, é extremamente importante manter um alto fator de refletividade nas superfícies espelhadas dos heliostatos. Assim, uma limpeza regular é essencial para a manutenção dos níveis de produtividade desejados. Fatores como o acúmulo gradativo de poeira, sujeira ou até mesmo de excremento de pássaros nas superfícies refletoras dos heliostatos podem causar a diminuição da eficiência de todo o sistema.

O fenômeno conhecido como sujidade ou *soiling* consiste no depósito de diferentes tipos de sujeiras em uma superfície exposta em um dado ambiente. Trata-se de uma questão crítica para ambas as tecnologias solares, fotovoltaica e CSP. No caso das usinas solar térmicas de torre central, de fato, o acúmulo de sujeiras causa uma redução significativa na quantidade de radiação solar que atinge o receptor posicionado no alto da torre, o que influencia negativamente na quantidade de energia gerada pelo sistema. Além disso, existe o fato de que os operadores de usinas de energia solar concentrada têm de encontrar o melhor cenário para os ciclos de limpeza dos heliostatos, a fim de manter uma alta refletividade/eficiência, sem consumir um alto volume de água, combustível e tempo de trabalho (MERROUNI et al., 2015).

Segundo Wolfertstetter (2013), pode ser considerado sujeira tudo o que se instala nas superfícies dos heliostatos, incluindo: partículas de aerossol (micro partículas de sal); materiais inorgânicos; matérias biológicas como pólen, bactérias, líquens e excrementos de pássaros; e areia. O autor apresenta, ainda, o que chama de princípios básicos da sujeira, sendo:

1. A sedimentação das partículas na superfície ocorre devido à gravidade;
2. A adesão dessas partículas é influenciada pela umidade, eletrostática e/ou pelo princípio das forças/interação de Van der Waals (a soma de todas as forças atrativas ou repulsivas, que não sejam forças devidas a ligações covalentes entre moléculas - ou entre partes da mesma molécula - ou forças devido à interação eletrostática de íons);
3. A cimentação é reforçada devido ao sal e outros produtos químicos.

Ainda de acordo com o autor, no geral, existem poucas pesquisas específicas sobre o tema na área de CSP e afirma, ainda, que as perdas pelo acúmulo gradativo de sujeira nas superfícies espelhadas podem representar, semanalmente, de 1% até 25% da taxa de refletividade dos espelhos, variando de acordo com a localização das usinas.

No caso das usinas solares de torre central de Almería, na Espanha, e NOOR III, no Marrocos, as perdas na taxa de refletividade dos espelhos componentes dos heliostatos representam 3,6% e 4,2% por semana, respectivamente (SARVER et al., 2013; COSTA et al., 2016).

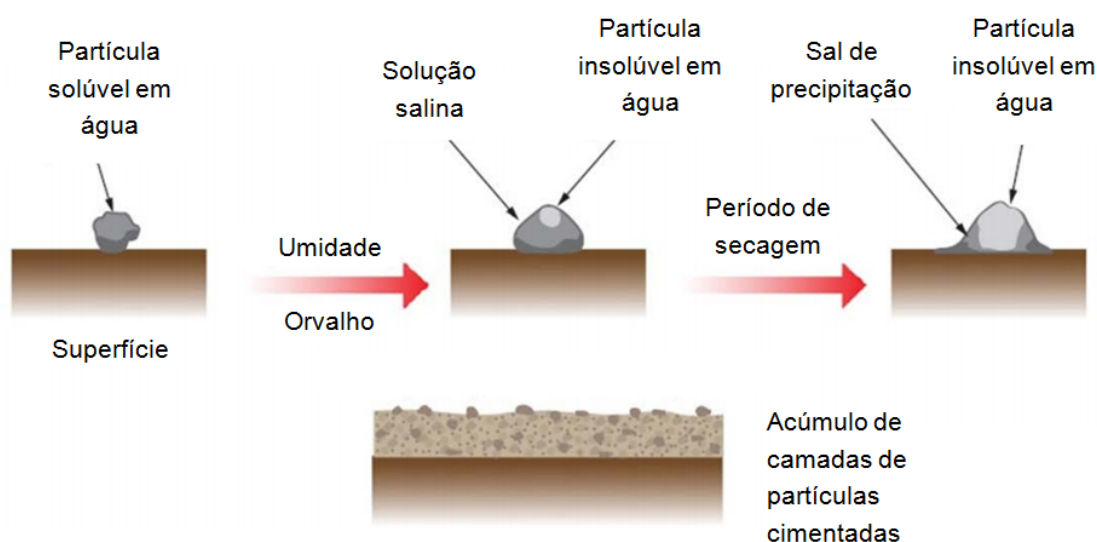
O comportamento de deposição e as taxas de acumulação de sujeiras em superfícies podem variar drasticamente em diferentes localidades. Esses fatores são influenciados pela geografia, clima e até na taxa de urbanização de uma região. Importantes características dos resíduos são, tipicamente, tamanho e distribuição, densidade, forma, composição química, carga e capacidade de adesão. Condições ambientais importantes que se relacionam com estas características são: umidade, vento (variação na direção e velocidade) e variações do tempo de exposição (SARVER et al., 2013).

A natureza microscópica da sujeira é explicada detalhadamente por Cuddihy (1983), conforme a Figura 21, a seguir. Nota-se a influência de fatores como

umidade, partículas de sal e mesmo orvalho no estado de junção de uma partícula solúvel em água com partículas insolúveis, até se tornarem camadas de partículas cimentadas numa determinada superfície.

A necessidade de água para a limpeza dos espelhos dependerá, principalmente, do método a ser utilizado, da localização da usina. Em áreas com chuvas frequentes e com poeira gerada a partir das partículas do solo, a demanda por água é menor. Apesar disso, nem sempre áreas com essas características são as melhores opções para a instalação de usinas CSP. A demanda por água nos locais mais áridos é um critério importante no planejamento de usinas CSP (MIKUSZIES, 2015).

Figura 21 - Natureza microscópica da sujeira



Fonte: Adaptado de CUDDIHY (1983).

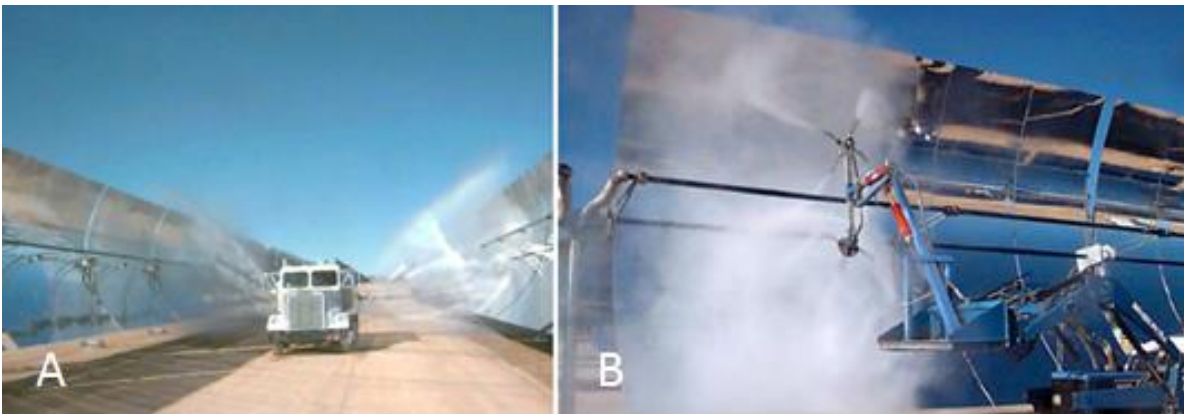
Sobre a limpeza das superfícies espelhadas pelos métodos naturais, ou seja, chuva, orvalho e vento, sem a intervenção de demais técnicas ou dispositivos Wolfertstetter (2013) destaca que a chuva irá limpar os espelhos somente acima de uma certa intensidade e que chuvas fracas podem, inclusive, ter o efeito oposto: a chuva fraca lava as partículas suspensas na atmosfera e as deposita na superfície do espelho. Quanto maior a intensidade da chuva, menos sujeira ficaria depositada nas superfícies espelhadas. Em alguns casos, o orvalho pode limpar os espelhos; porém, acaba por auxiliar na cimentação de partículas menores nessas superfícies.

No caso do vento, tem sido demonstrado que este não têm nenhum efeito de limpeza em heliostatos.

Existem documentados diferentes métodos de limpeza de superfícies refletoras de usinas CSP, sendo a maioria deles baseados em sistemas que utilizam água pressurizada, água salgada, escovas e/ou pulverização de água ou outros produtos. Esses estudos envolvem as quatro tecnologias de usinas CSP já detalhadas. Nos últimos anos, houve apenas um pequeno aumento no número de pesquisas científicas relacionadas ao tema, porém, desta vez, se atentando ao baixo impacto no ambiente onde as usinas CSP estão inseridas e também com a preocupação de que a operação de limpeza não afete consideravelmente a produção de energia.

Inicialmente, menciona-se o estudo realizado por Cohen et al. (1999), onde são descritos métodos que utilizam água pressurizada para limpeza das calhas parabólicas das usinas SEGs III, IV, V, VI e VII. Conforme pode ser visto através da Figura 22, à esquerda (item A) é exposto um método bastante tradicional, onde de água desmineralizada é pulverizada em alta pressão por caminhões nas fileiras paralelas de espelhos. No lado direito (item B), uma outra maneira que também utiliza água desmineralizada sob alta pressão é apresentada, porém, usando um veículo portando um mecanismo rotativo conhecido como "*Twister*". Os métodos de limpeza descritos mostram-se eficazes na limpeza de espelhos sujeitos ao efeito da sujidade característica de um deserto convencional.

Figura 22 - Limpeza de calhas parabólicas das usinas SEGs



Fonte: Adaptado de COHEN et al. (1999, p. 17-18).

Um sistema baseado em caminhões despejando água pressurizada é usado para a limpeza de heliostatos na usina de torre central conhecida como Gemasolar, na Espanha. Este sistema, desenvolvido pela empresa Torresol Energy, limpa 2.650 heliostatos que representam uma área de campo solar de 300.000 m². Dependendo do quão sujo estiverem os heliostatos, o caminhão pode fazer uso de diferentes velocidades e variar a pressão de água para realizar a limpeza (BURGALETA et al., 2012). O método é apresentado na Figura 23.

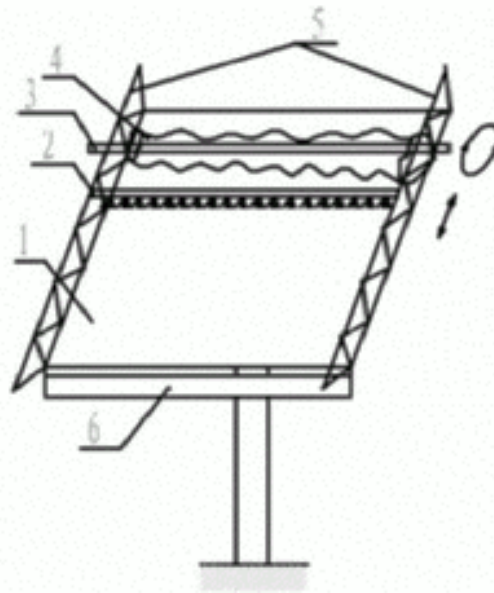
Figura 23 - Limpeza de heliostato usando caminhão e água pressurizada na usina Gemasolar



Fonte: BURGALETA et al. (2012).

O trabalho desenvolvido por Zhang et al. (2007) apresenta uma síntese dos diferentes métodos de limpeza existentes de acordo com certas condições ambientais: uso de ar comprimido; utilização de água com alta pressão; uso de máquinas automatizadas para realizar uma sequência determinada de tarefas (*automatons*); além da apresentação de um método que utiliza água, escovas e calhas, detalhado na Figura 24.

Figura 24 - Método para limpeza de heliostato proposto por Zhang et al. (2007)



Fonte: ZHANG et al. (2007, p. 1783).

Na Figura 24, o número 1 indica a superfície refletora do heliostato (espelho). Um tubo para borrifar água é indicado pelo número 2. Os números 3 e 4 estão relacionados à uma haste e uma escova de limpeza, respectivamente. As hastes de sustentação do sistema, responsável pela sua movimentação vertical são indicadas pelo número 5. Por fim, o número 6 aponta uma calha.

O sistema apresentado por Zhang et al. (2007) funciona em quatro estágios: no primeiro deles, água limpa é borrifada na superfície refletora do heliostato por meio do tubo indicado pelo número 2 que se movimenta verticalmente. Opcionalmente, detergente ou outro tipo de material de limpeza pode ser adicionado à água. Em seguida, a escova rotativa com cerdas de borracha movimenta-se também verticalmente para realizar a limpeza da superfície espelhada. O terceiro passo é semelhante ao primeiro, com a borrifação de água limpa objetivando o enxágue do espelho, Por fim, a água com os resíduos (poeira, excrementos de pássaros etc.) é recolhida pela calha localizada abaixo da superfície refletora para que não venha a afetar o terreno.

Desde 2011, o SENER, uma empresa privada de engenharia e tecnologia, localizada na Espanha, e que atua com empreendimentos voltados às indústrias aeronáutica, aeroespacial, de energia e de meio ambiente, trabalha no

desenvolvimento do projeto HECTOR (*Heliostat Cleaning Team Oriented Robot*). Trata-se de um robô de tamanho pequeno responsável pela limpeza de superfícies refletoras de heliostatos. A iniciativa visa minimizar três fatores: o tempo da operação de limpeza, o consumo de água e a necessidade de intervenção humana. O robô é movido por baterias e não utiliza nenhuma fonte externa de energia ou de suprimento de água durante a operação, que consiste em limpar e secar as superfícies espelhadas. O equipamento utiliza diversos sensores e softwares de localização que permitem a sua navegação automática sem necessidade de supervisão humana. De fato, o trabalho humano se faz necessário apenas no reabastecimento do tanque de água, troca de baterias e a distribuição dos equipamentos em diferentes pontos do campo de heliostatos. Por fim, de acordo com o SENER, HECTOR pode atuar de dia e de noite. O fato de operar no período noturno traz uma série de vantagens para o sistema, pois permite que os procedimentos de limpeza ocorram sem afetar a produtividade da usina CSP e ainda aproveita o fato de os heliostatos estarem em posição de segurança na horizontal (*stow position*) (SENER, 2012). A Figura 25 apresenta o robô HECTOR realizando a limpeza de um heliostato durante a sua fase de testes, na PSA (Plataforma Solar de Almería), na Espanha.

Figura 25 - HECTOR realizando a limpeza da superfície espelhada de um heliostato na PSA, Espanha



Fonte: SENER (2012, p. 21)

Também desenvolvido pelo SENER, o mecanismo intitulado "*PARIS-Autonomus*" é um sistema de limpeza aplicado a cilindros parabólicos que faz uso de escovas rotativas. O PARIS possui 4 metros de comprimento por 4 metros de largura, peso reduzido e se caracteriza por ser autônomo, ou seja, sem necessidade de pilotagem pelo homem. A escova umedecida é movida verticalmente e, assim, limpa a calha, como mostrado na Figura 26 (VICENTE et al., 2012).

Figura 26 - PARIS - Sistema autônomo de limpeza de calhas parabólicas



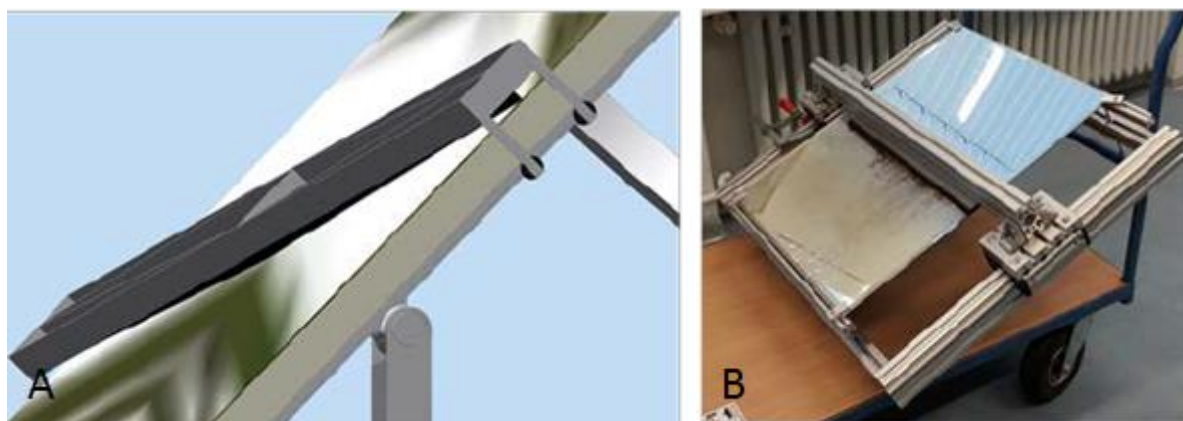
Fonte: VICENTE et al. (2012).

O estudo desenvolvido por Fernández-García et al. (2014) foi focado na otimização de métodos de limpeza de refletores solares para aplicações CSP em condições reais em um clima semidesértico. Não se focou em um dispositivo automatizado. Os testes consistiram em expor ao ar livre refletores solares e aplicar diferentes métodos de limpeza em cada um deles, sendo estes baseados em: água desmineralizada de alta pressão; água desmineralizada de alta pressão + 2% de detergente; água desmineralizada de alta pressão com o uso de escova de limpeza; uso de vapor + tecido fino. Os resultados mostraram que o método de limpeza mais

eficaz foi o baseado em uso de água desmineralizada e uma escova, com eficiência média de 98,8% nos períodos chuvosos e 97,2% em estações secas. Esse método se mostrou altamente suficiente e a adição de detergente não aumentou a sua eficácia. O método de limpeza baseado em vapor foi ineficiente (eficiência de 97,3% em um período de chuvas), de acordo com os padrões da pesquisa.

O mecanismo de limpeza de heliostato proposto por Pfahl et al. (2015b) baseia-se na ideia de limpar os espelhos toda vez que eles estiverem úmidos, através de uma peça transversal a que se prende uma faixa de borracha, similar a um rodo, movida pela gravidade. Considera-se que, se as partículas depositadas sobre o espelho não estão secas, poderão ser facilmente removidas. Em determinadas condições, a partícula não estará suficientemente úmida para ser removida. Nesses casos, seria necessário fornecimento de água adicional para efetuar a limpeza. Um pequeno protótipo foi criado, como pode-se ver na Figura 27, sendo que do lado esquerdo (item A) visualiza-se o projeto elaborado no *software* Autodesk Inventor e, no lado direito (item B) o mecanismo construído.

Figura 27 - Sistema de limpeza de heliostato - rodo movido pela gravidade



Fonte: PFAHL et al. (2015b, p. 10).

No Brasil, não existem pesquisas com a temática proposta nesse trabalho. Na realidade, a questão da sujidade é abordada, quase que em sua totalidade, por estudos científicos voltados aos sistemas fotovoltaicos, como no caso do trabalhos de Hickel et al. (2016) e Lemos et al. (2016).

O trabalho realizado por Hickel et al. (2016) envolveu uma avaliação criteriosa do acúmulo de sujeira em sistemas fotovoltaicos (FV) localizados no interior da Bahia e seus efeitos em cinco diferentes tecnologias de módulos FV. Para quantificar as perdas nos sistemas, medições em campo foram realizadas, gerando, assim, dados para uma subsequente análise que levou em consideração as principais métricas utilizadas entre a comunidade fotovoltaica internacional. Os resultados mostraram perdas por sujeira consideráveis e com diferenças não negligenciáveis entre as tecnologias utilizadas. Ressalta-se, portanto, a importância da avaliação das condições de acúmulo de sujeira de um determinado local antes da implantação e durante a operação de sistemas FV.

Lemos et al. (2016) citam em seu estudo que o fator sujidade é comumente negligenciado ou subestimado quando se trata da construção de uma instalação solar fotovoltaica. As células fotovoltaicas estão sujeitas a ação da poluição e a aderência de sujidades aos vidros dos módulos fotovoltaicos prejudica a transmissividade ótica da radiação solar até as células fotovoltaicas, reduzindo a eficiência do sistema. O trabalho restringe-se a uma revisão bibliográfica sobre o efeito do acúmulo de sujidade no desempenho de módulos fotovoltaicos.

Mikuszies (2015), pesquisador de origem alemã, fez uso de dados brasileiros para realização de seu estudo. O trabalho realizado pelo autor, intitulado "Impactos ambientais de usinas solartérmicas" (*Umweltauswirkungen von solarthermischen Kraftwerken*), estimou o volume de água a ser consumido pelo processo de limpeza dos espelhos dos heliostatos nas duas usinas-piloto CSP de torre central citadas anteriormente: a de Caiçara do Rio do Vento/RN e de Pirassununga/SP. O cálculo baseou-se nos valores mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Características das plantas-piloto CSP de torre central

	Caiçara do Rio do Vento/RN	Pirassununga/SP
Nº. de heliostatos	47	75
Área do heliostato (m ²)	8,03	8,03
Área do campo solar (m ²)	377,41	602,25
Operações de limpeza (em um ano)	24	24

Fonte: MIKUSZIES (2015, p. 36).

Assume-se que a limpeza seria feita com água em alta pressão. O volume de água necessário foi calculado com base em estimativas de uso deste recurso para limpeza dos heliostatos nas usinas de Ivanpah, Rice e Palen, nos EUA. A média relacionada ao consumo de água para limpeza das superfícies dos espelhos das três usinas foi de 26,52 L/m²ano.

Pela simulação feita por Mikuszies (2015), chegou-se aos seguintes resultados: o consumo anual total de água para limpeza dos heliostatos para Pirassununga/SP seria de aproximadamente 16.000 litros e para Caiçara do Rio do Vento/RN, cerca de 10.000 litros. Os valores mais altos em Pirassununga referem-se especificamente ao maior número de heliostatos utilizados na usina; não foram levadas em consideração as diferentes características geográficas e climáticas dos locais. O consumo de água anual por heliostato foi de 213 litros para Pirassununga/SP e para Caiçara do Rio do Vento/RN, visto que em ambos os empreendimentos, o modelo do heliostato e a área total das superfícies refletoras é o mesmo. Na usina de Ivanpah, esse valor é de 246 litros, ou seja, ligeiramente acima, apesar de os espelhos que compõem os heliostatos terem área quase duas vezes maior. Por fim, observou-se que os valores de água consumida por m² de espelho em cada operação de limpeza seriam 1,11 l/m². Para tal, foram consideradas em ambas as usinas, duas limpezas mensais (24 limpezas por ano). Nas três usinas americanas usadas como base para comparação, esses valores variaram de 0,3 l/m² até 0,7 l/m², ou seja, mais baixos do que as plantas-piloto brasileiras. Os seguintes fatores poderiam influenciar essa diferença: diferentes níveis acumulação de sujeira nos heliostatos; frequência de chuvas; metodologia de limpeza; e material da superfície refletora.

Por fim, nota-se que a questão da limpeza dos heliostatos é complexa e que o consumo de água para tal depende do método a ser utilizado, da localização da usina e de características climáticas como quantidade de chuva, vento, orvalhos, entre outras.

1.3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, são relacionados os materiais considerados necessários para a construção do dispositivo automático de limpeza de heliostatos, bem como é apresentada a metodologia utilizada neste estudo, com base nos objetivos definidos e também quanto aos procedimentos técnicos usados para o desenvolvimento do trabalho.

1.3.1 Materiais

O projeto do mecanismo proposto neste estudo foi pautado nas características e dimensões do heliostato construído para a realidade brasileira e atualmente exposto no Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Unesp/Botucatu. O heliostato foi o resultado principal do projeto INoPa/CEISA, ocorrido em 2014, por meio de uma iniciativa de cooperação acadêmica e científica entre as seguintes instituições: *Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg*; *FH Aachen: Solar-Institut Jülich*; *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)*; *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*; *Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD)*; Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP); Universidade de São Paulo (USP) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). O heliostato possui 3,26 metros de comprimento por 2,5 metros de largura, totalizando área de aproximadamente 8 m². Ele é composto por 6 tiras de espelhos colados em vidro para maior sustentação e suporte às ações do vento. Cada tira possui cerca de 541 milímetros de comprimento por 2.500 milímetros de largura. Entre cada tira de espelho, verticalmente, há um espaço de 2,8 milímetros. Uma representação deste equipamento foi apresentada anteriormente, na Figura 15-A.

A construção e operação do dispositivo automático para limpeza das superfícies refletoras que compõem heliostatos necessitou de elementos elétricos, eletrônicos e mecânicos. Estão listados na Tabela 5, a seguir, os componentes elétricos e eletrônicos, bem como suas respectivas características.

Tabela 5 - Listagem de materiais elétricos e eletrônicos necessários para a construção do dispositivo de limpeza de heliostatos

Componente	Descrição/Características
Sensor de chuva / Nível de água	Tensão de operação: 3,3-5V; Corrente de trabalho: menos de 20mA; Tensão de saída: 0~2,3V (0 quando o sensor está totalmente seco e, no máximo, 2,3V quando o sensor está totalmente mergulhado em água).
Arduino (Micro controlador ATmega2560)	Tensão de Operação: 5V; Tensão de Entrada: 7-12V; Portas Digitais: 54; Portas Analógicas: 16; Corrente Pinos I/O: 40mA; Corrente Pinos 3,3V: 50mA; Memória Flash: 256KB (8KB usado no bootloader); SRAM: 8KB; EEPROM: 4KB; Velocidade do Clock: 16MHz.
Módulo Real Time Clock (RTC)	Chip: DS1302; Capacidade: 56 bytes de SRAM; Interface SPI - 3 fios; Circuito de detecção de falha de energia; Consumo de 500nA no modo bateria com oscilador em funcionamento; Faixa de temperatura: -40°C a +85°C; Dimensões: 2,9 x 2,6 cm.
Módulo Bluetooth	Modelo: HC-05 com antena embutida na placa; Cobertura de sinal: até 10m; Protocolo Bluetooth: v2.0+EDR; Firmware: Linvor 1.8; Frequência: 2,4GHz Banda ISM; Modulação: GFSK (<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>); Potência de transmissão: não mais do que 4dBm, Classe 2; Sensibilidade: não superior a -84dBm 0,1% BER; Taxa de dados: Assíncrono: 2.1Mbps (Max) / 160 kbps - Síncrono: 1Mbps/1Mbps; Perfis suportados: modo Escravo (Slave) e Mestre (Master); Taxa máxima de transmissão serial: 1382400bps; Tensão de Alimentação: 3,6 a 6V; Corrente: Pareado 35mA; Conectado 8mA; Dimensões: 4.3 x 1.6 x 0,7cm.
Dois motores 12 VCC	Tensão nominal: 12VCC; Corrente nominal : 1,6 A; Potência nominal : 20 Watts; Torque: 9,12 N.m / 93Kg.cm; Rotação nominal : 100 RPM; Peso: 0,600 kg.
Três contatores	Bobina 127 VCC; Corrente: 10 A.
Fonte de alimentação	Tensão 127 V; Saída 12 VCC; Corrente de saída: 0 a 20 A.
Três módulos Relé 5V	Modelo SRD-05VDC-SL-C; Permite controlar cargas de 220V AC; Corrente típica de operação: 15~20mA; Tensão de saída: (30 VDC a 10A) ou (250VAC a 10A); Tempo de resposta: 5~10ms; Dimensões: 51 x 38 x 20mm; Peso: 30g.
Dois sensores indutivos	Modelo: LJ12A3-4-Z/BX; Tipo Normal Fechado; Tensão de Trabalho: CC 6-36V; Corrente de saída: 300mA; Polaridade: PNP; Dimensões: 12mm x 12mm x 55mm; Distância de detecção : 4 mm; Objetos detectados: Condutores.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O sensor de chuva faz uso de condutores paralelos que entram em curto quando são molhados. Assim, o sensor converte o nível de água que atinge a placa em sinal

analógico. Quando está seca, a saída do sensor permanece em estado alto (HIGH) e quando há detecção de chuva, o estado altera-se para baixo (LOW). O sensor escolhido possui revestimento em ambos os lados, com um tratamento de níquel contra oxidação, melhorando, assim, a condutividade, desempenho e vida útil.

Um Arduino é uma pequena placa microcontroladora que contém uma conexão Universal Serial Bus ou Porta Universal, em português (USB), tornando possível a sua ligação com um computador. Além disso, possui diversos terminais que permitem a conexão com dispositivos externos, como motores, relés, diversos tipos de sensores, entre outros. Um Arduino pode ser energizado pelo computador através de um cabo USB, por uma bateria de 9V ou por outra fonte de alimentação. Pode ser controlado diretamente pelo computador ou em formato livre de conexão com outras máquinas. Neste último caso, ele é primeiro programado pelo computador por meio da conexão USB e, em seguida, desconectado deste computador, mantendo o algoritmo de programação em seu interior, executando-o autonomamente. As principais vantagens da utilização deste componente são: trata-se de projeto aberto, ou seja, qualquer indivíduo pode construir placas compatíveis com o Arduino, o que acarreta em dispositivos de baixo custo; as placas básicas podem ser complementadas por acessórias, chamadas shields; o software de programação é de fácil utilização (linguagem baseada em C++) e é gratuito para os sistemas Windows, MAC e Linux (MONK, 2014).

O Real Time Clock (RTC) é um módulo que trabalha como um relógio em tempo real. Considerado de alta precisão, é capaz de fornecer informações como segundos, minutos, horas, dias da semana, dias do mês, meses e anos (intervalo de 2000 até 2099). Os dados são enviados para um controlador secundário, no caso, o Arduino, através de comunicação circuito inter-integrado (*Inter-Integrated Circuit* ou I²C). No sistema, será um componente muito útil para, além de processar dados de tempo/hora, possibilitar a execução das ações de limpeza em horários predeterminados.

O Módulo *Bluetooth* foi escolhido por oferecer uma forma fácil e barata de comunicação entre o computador e o Arduino. Apesar de possuir potência de transmissão não maior do que 4dBm e se tratar de um dispositivo Classe 2, o alcance mostrou-se adequado para a finalidade deste trabalho.

Optou-se pela utilização de dois motores com tensão nominal de 12VCC, sendo um responsável pelo movimento de avanço e retorno do rolo de limpeza e o outro para realizar a rotação das cerdas. Para tal, serão aplicados dois motores acionadores de vidros elétricos de automóveis. A facilidade na aquisição, seu peso e dimensões reduzidas e o custo baixo foram os fatores que influenciaram na escolha.

Em relação ao uso de relés e contadores, ressalta-se que esses componentes têm funções semelhantes, mas com características próprias que os diferenciam em comportamento e aplicação. O relé é um dispositivo elétrico destinado a produzir modificações súbitas e predeterminadas em um ou mais circuitos elétricos de saída, quando alcançadas determinadas condições no circuito de entrada, que controla o dispositivo. Assim, o relé não possui a função de interromper o circuito principal, mas sim de fazer atuar o seu sistema de manobra. Um relé tem como função permitir o funcionamento de outros aparelhos conectados ao mesmo ou em outro circuito elétrico que estejam ligados ao relé, devido a uma alteração nas condições do equipamento pela passagem da corrente elétrica. Funciona como uma chave automática comutadora que atua pela alteração de algumas variáveis predeterminadas. São utilizados para controlar o fluxo de correntes e sua aplicação se dá comumente em instalações de baixa tensão. Um contator é um dispositivo eletromecânico de manobra que, a partir de um circuito de comando, faz o controle de cargas em um circuito de potência. Pode estabelecer, conduzir e interromper correntes elétricas em condições normais de cargas, como motores, resistências, circuitos auxiliares, entre outros (CUNHA, 2009).

Um sensor do tipo indutivo apresenta a capacidade de detectar objetos metálicos em pequenas distâncias. Assim, pode ser utilizado como um sensor de proximidade. A escolha deste tipo de sensor deu-se pelos seguintes fatores: baixo custo; não possuir partes móveis; vida útil prolongada em relação aos sensores fim de curso que utilizam contatos mecânicos; e que, por serem componentes bem vedados, podem atuar em ambientes com poeira externos e em contato com líquidos. Outra característica que foi considerada primordial para a escolha deste tipo de sensor é que, apesar da pequena distância de detecção (4 mm, de acordo com dados fornecidos pelo fabricante), apresenta ótima precisão e, portanto, é possível utilizá-lo com alta repetibilidade em medições de proximidade.

Na Tabela 6, apresentam-se os itens utilizados para a construção da parte mecânica do dispositivo de limpeza proposto neste estudo, além das respectivas quantidades necessárias. Por uma questão de organização, os componentes foram categorizados de acordo com a sua finalidade no sistema, sendo: elementos de fixação; materiais para pintura e acabamento; materiais não ferrosos; materiais ferrosos; e mancais e rolamentos. A escova composta de cerdas de nylon e o cabo de aço foram incluídos na categoria "outros materiais".

Tabela 6 - Listagem de materiais necessários para a construção da estrutura mecânica do dispositivo de limpeza de heliostatos

Componente	Quantidade
Elementos de fixação	
Parafuso sextavado 1/4"x2" UNC	8 unidades
Parafuso sextavado 1/4"x1/2" UNC	4 unidades
Parafuso sextavado 3/8"x2" UNF	26 unidades
Parafuso sextavado 3/8"x1 1/2" UNF	4 unidades
Parafuso sextavado 6mm X 20mm 8.8 grau	12 unidades
Parafuso Allen 1/4"x1/2" UNC sem cabeça	2 unidades
Parafuso sextavada 3/8"x2 1/2" UNC	4 unidades
Arruela lisa 3/8"	68 unidades
Arruela lisa 1/4"	20 unidades
Arruela de pressão 1/4"	16 unidades
Porca sextavada 3/8" UNF	30 unidades
Porca sextavada 3/8" UNC	4 unidades
Porca sextavada 1/4" UNC	8 unidades
Trava para eixo 15 mm	4 unidades
Anel elástico MKE 12mm	12 unidades
Pino elástico 3mm x 40mm	6 unidades
Abraçadeiras (grampos) para cabo de aço (1/8")	8 unidades
Pintura e acabamento	
Tinta esmalte cinza martelado	1,8 litros
Thinner 2750	0,9 litros
Catalisador	0,15 litros
Materiais não ferrosos	
Barras de alumínio redondas	0,6 Kg
Nylon	0,4 Kg
Materiais ferrosos	
Chapa de aço carbono 1/8"	2 unidades

Chapa de aço carbono 3/16"	39 unidades
Chapa galvanizada 16 (1,5mm de espessura)	1 unidade
Metalon 50x30x1,20 mm	8 metros
Metalon 50x20x1,20 mm	2 metros
Perfil de aço carbono dobrado (espessura 1,2 mm)	7 metros
Tubo de aço carbono 1"	6 metros
Chumbo	10,1 Kg
Mancais e rolamentos	
Rolamento 6202ZZ (rígido de esferas; diâmetro interno: 15 mm; diâmetro externo: 35 mm; blindado nos dois lados)	4 unidades
Mancal de rolamento UCR 204 (diâmetro interno 20 mm); tipo pedestal, sem anel excêntrico + rolamentos	5 unidades
Outros materiais	
Escova com base de PP; 40mm (diâmetro externo) X 2580mm (comprimento) X 26mm (diâmetro interno); cerdas de nylon 0.15mm	1 unidade
Cabo de aço revestido 1/16" (6x7)	30 metros

Fonte: Elaborada pelo autor.

O computador utilizado para receber e enviar dados ao microprocessador (Arduino) foi um netbook com processador VIA C7-M 1.2 GHz, 1 Gb de memória RAM e com capacidade para armazenar 100 Gb de dados em disco rígido. O sistema operacional instalado foi o Windows 7 Ultimate e optou-se pela utilização do software CoolTerm, versão 1.4.4, como ferramenta de interface homem-máquina neste projeto. O CoolTerm é um programa gratuito (*freeware*) e de fácil operação que serve como terminal para comunicação com o hardware conectado a portas seriais. É disponibilizado para download gratuitamente através do site <<http://freeware.the-meiers.org/>>.

São vários os recursos do CoolTerm, sendo que os listados a seguir foram determinantes para a decisão em usá-lo neste estudo:

- a) Capacidade de suportar múltiplas conexões simultâneas, no caso de várias portas seriais estarem disponíveis;
- b) Exibição dos dados recebidos em formato texto ou hexadecimal;
- c) Envio de dados por meio do teclado e suporte à entrada de dados em formatos texto simples ou hexadecimal;

- d) Envio de dados através de comandos copiar-colar (CTRL+C e CTRL+V) na janela do terminal;
- e) Envio de arquivos de texto.
- f) Capacidade de capturar dados recebidos em arquivos de texto;
- g) *Echo* local dos dados transmitidos e dos dados recebidos;
- h) Indicadores de estado;
- i) Capacidade de salvar e recuperar opções de conexão.

Considerando que é possível utilizar o sistema por meio de dispositivos móveis, também, na fase de testes, fez-se uso de um Tablet Samsung Galaxy Tab E 7.0, modelo SM-T113NU, tela 7", 8GB de memória interna, processador Quad Core de 1.3GHz, com sistema operacional Android 4.4.

Dois aplicativos foram testados para envio e recebimento de dados: o BlueTerm e o Bluetooth spp Pro.

Quanto ao BlueTerm, trata-se de um emulador de terminal que permite a comunicação com qualquer dispositivo usando um adaptador serial Bluetooth, ou seja, o protocolo RFCOMM / SPP (*Radio Frequency Communications / Serial Port Profile*) simula a comunicação serial através de Bluetooth. É uma aplicação de código-aberto (*opensource*) e pode ser acessado gratuitamente por meio do site <<http://pymasde.es/blueterm/>>.

O Bluetooth spp Pro é um aplicativo para Android que atua como uma ferramenta capaz de conectar dispositivos dotados de Bluetooth e simular uma porta de comunicação serial. Os seus principais recursos referem-se à pesquisa de dispositivos Bluetooth e exibição de sua classe e intensidade do sinal (*Received Signal Strength Indication* - RSSI); uso de comunicação serial para recebimento e envio de dados; as entradas e saídas podem ser operadas em modo ASCII (esquema de codificação que atribui valores numéricos a caracteres visando padronizar a troca de dados entre dispositivos) ou HEX (hexadecimal); e os resultados podem ser guardados em cartão SD.

Para visualização e filtragem dos dados contidos no arquivo .CSV, fez-se uso do software Microsoft Excel, devido à seu fácil manuseio e pelo fato de estar disponível em praticamente todos os computadores na atualidade.

1.3.2 Métodos

Quanto ao objetivo, este estudo pode ser classificado como descritivo e exploratório, pois apresenta tanto características relacionadas à observação, análise, registro, descrição e correlação de fatos ou fenômenos, quanto à questão do aprimoramento de ideias e a descoberta de intuições.

Para levantamento do cenário histórico, bem como atual, relacionado ao tema CSP, e também sobre os existentes métodos de limpeza de heliostatos, utilizou-se o estudo bibliográfico, ou seja, pesquisa em livros, trabalhos científicos, sites da Internet e publicações em revistas institucionais para levantar os aspectos teóricos sobre o tema, com a finalidade de colocar o pesquisador em contato direto com aquilo que foi escrito sobre o assunto, com o objetivo de permitir o reforço paralelo na análise da pesquisa ou manipulação de suas informações.

Para fundamentar o desenvolvimento do dispositivo automatizado para limpeza de superfícies refletoras de heliostatos e a validação do dispositivo de limpeza de superfícies espelhadas, a abordagem foi qualitativa e quantitativa, englobando todas as singularidades implícitas no processo. Considera-se que o método qualitativo busca descrever comportamentos de variáveis e situações, enquanto o método quantitativo procura mensurar, ou medir, variáveis.

A ideia do desenvolvimento de um dispositivo automatizado para efetuar a limpeza de superfícies refletoras de heliostatos em usinas CSP de torre central surgiu a partir de estudos desenvolvidos após a completude do projeto I-NoPa/CEISA (Programa Novas Parceria Integradas/Consórcio Educacional para a Integração e Sustentabilidade na Agroindústria), o qual teve como resultado principal a montagem e operacionalização de um heliostato de 8 m² na Faculdade de Ciências Agrônômica da UNESP, campus de Botucatu, com características já citadas anteriormente.

O princípio de ativação do mecanismo por meio da detecção de chuva, fator diretamente relacionado ao baixo consumo de água por parte do artefato, baseou-se no fato de a região de Botucatu apresentar consideráveis índices pluviométricos durante todo o ano, conforme os dados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados pluviométricos da cidade de Botucatu-SP

Quantidade de chuva total anual (considerando os últimos dez anos)		Médias mensais dos índices pluviométricos, distribuídas por ano		
Ano	Índice pluviométrico (em mm)	Meses	De 2006 até 2016	De 1971 até 2016
2006	1.233,20	Janeiro	348,02	286,60
2007	1.292,60	Fevereiro	185,40	201,46
2008	1.178,20	Março	141,67	170,58
2009	1.983,30	Abril	94,51	76,75
2010	1.355,84	Maiο	70,55	81,71
2011	1.893,98	Junho	67,28	59,73
2012	1.895,70	Julho	55,11	43,63
2013	1.520,03	Agosto	35,76	38,02
2014	1.051,20	Setembro	68,84	86,33
2015	1.850,90	Outubro	127,96	117,86
2016	1.859,75	Novembro	134,12	141,01
		Dezembro	226,66	211,50

Fonte: Elaborada pelo autor com base nas medições da estação meteorológica do Depto de Eng. Rural, FCA/Unesp/Botucatu.

Observa-se, a partir da Tabela 7, que a somatória total anual da quantidade de chuva, distribuída entre os últimos onze anos, apresenta valores entre 1.051,20 mm (2014) e 1.983,30 mm (2009) e que, historicamente, os meses de outubro até março são os mais chuvosos, fato evidenciado por meio das médias mensais, tanto nos últimos onze anos, quanto de 1971 até o 2016. Mesmo nos meses de julho e agosto, quando a precipitação pluviométrica apresenta os índices mais baixos, ainda ocorrem quantidades de chuva suficientes para se efetuar a limpeza das superfícies refletoras de heliostatos. Em casos isolados, o uso de um suprimento de água adicional se faz necessário.

O mecanismo de limpeza de espelhos componentes de heliostatos apresentado neste trabalho foi fundamentado, principalmente, em três estudos previamente expostos: sua estrutura mecânica foi adaptada com base na ideia mostrada no trabalho de Zhang et al. (2007). A questão da utilização de água da chuva para auxiliar o processo de limpeza dos heliostatos ocorreu após a verificação dos resultados do estudo elaborado por Mikuszies (2015): considerou-se alto o volume anual total de água necessário para limpar os heliostatos nas plantas-piloto de Pirassununga/SP (16.000 litros) e Caiçara do Rio do Vento/RN (10.000 litros). Por

fim, o estudo desenvolvido por Fernández-García et al. (2014) foi importante para a decisão de não utilizar nenhum tipo de detergente ou outras soluções de limpeza: após testar quatro tipos de métodos de limpeza (água desmineralizada de alta pressão; água desmineralizada de alta pressão + 2% de detergente; água desmineralizada de alta pressão com o uso de escova de limpeza; uso de vapor + tecido fino), evidenciou-se que o método de limpeza mais eficaz foi o baseado em uso de água desmineralizada e uma escova, com eficiência média de 98,8% nos períodos chuvosos e 97,2% em estações secas. Observou-se que o número de passagens aplicadas com o método de água desmineralizada com alta pressão foi suficientemente elevado (no mínimo três repetições), a adição de um detergente não implica em um aumento da sua eficácia, pois o parâmetro de eficiência médio obtido pelos autores foi de 98,8% sem detergente e 98,6%, com detergente.

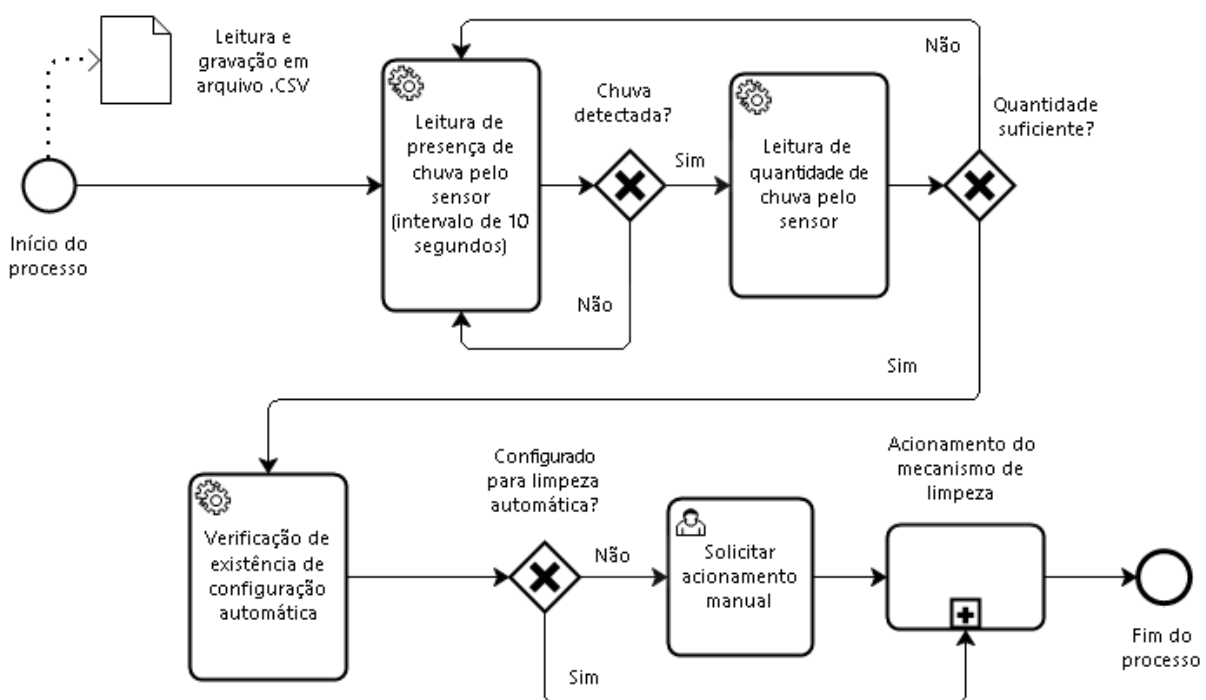
O dispositivo segue a seguinte lógica de funcionamento: num primeiro momento, são realizadas leituras dos valores emitidos pelo sensor de chuva em intervalos de um minuto. No caso de detecção de chuva, os condutores paralelos do sensor entram em curto e o nível de água é convertido em sinal analógico. O sensor em questão trabalha com uma escala aleatória de 0 até 700, sendo o valor 0 referente aos condutores paralelos totalmente secos, ou seja, sem existência de nenhum líquido sobre os mesmos, e 700 refere-se ao valor máximo de área em contato com líquido. O nível de chuva registrado pelo sensor é enviado via *Bluetooth* ao Arduino e o algoritmo faz a comparação do mesmo com o valor mínimo considerado como parâmetro de eficácia de limpeza, definido como 200 (valor padrão). Caso o nível de chuva detectado esteja abaixo deste valor mínimo, o algoritmo continua as leituras até que ele ultrapasse este valor ou volte a ser zero, no caso da ausência de chuva. Mesmo no caso de inexistência de chuva ou chuvas de baixa intensidade, é permitido ao usuário configurar limpezas futuras, ou seja, deixar o mecanismo preestabelecido para ser acionado na próxima ocorrência de chuva.

Ao ser constatada a existência de chuva e que a mesma apresenta nível superior ao parâmetro de eficácia ajustado, o algoritmo verifica se há alguma configuração automática de limpeza, ou seja, se num cenário anterior o usuário já havia inserido os comandos para acionamento do dispositivo de limpeza. Se essa configuração prévia existir, o mecanismo é acionado automaticamente naquele instante. Caso não haja, o sistema, por meio de um alerta na tela do computador,

informa ao usuário que ele pode optar por iniciar o processo manualmente. O usuário verifica os dados históricos sobre a limpeza do heliostato e, com base nas datas e horários registrados sobre as últimas operações de limpeza, decide se há a necessidade de iniciar o mecanismo naquele momento. Cabe a ele indicar o número de repetições da sequência de limpeza que deseja, sendo, no mínimo, uma e, no máximo, cinco.

Um fluxograma representando o macroprocesso de funcionamento do dispositivo é apresentado na Figura 28.

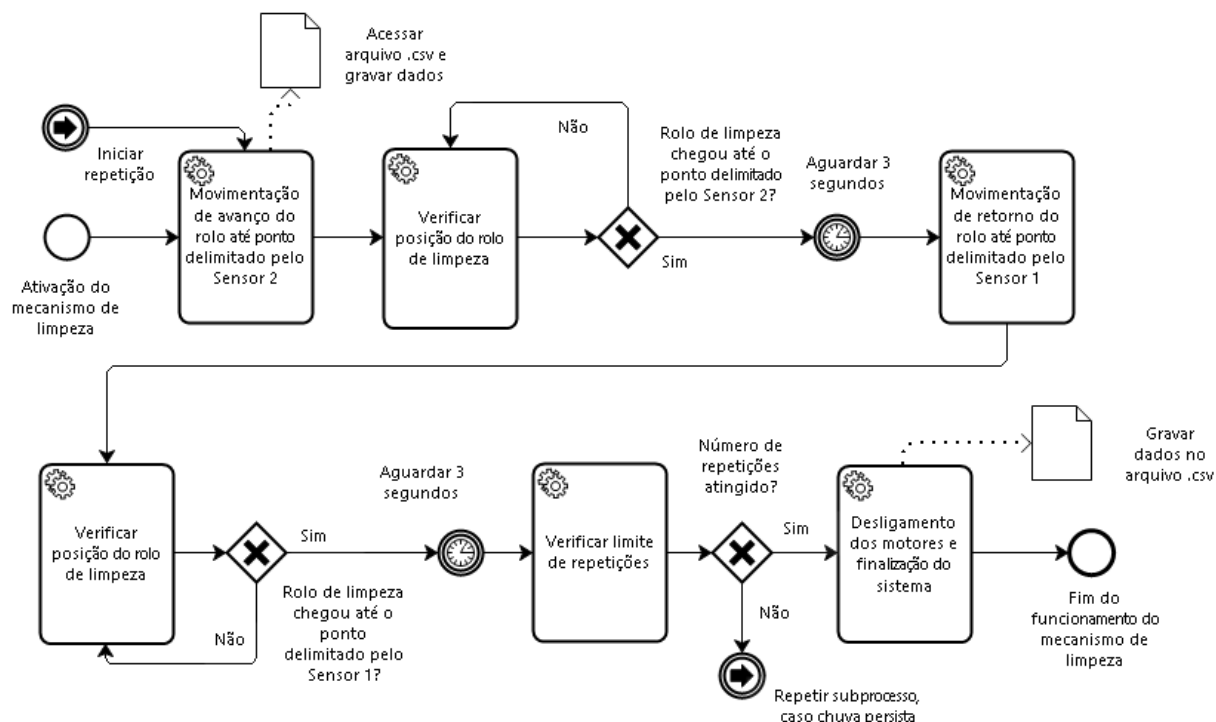
Figura 28 - Fluxograma - Macroprocesso representando o funcionamento do dispositivo de limpeza



Fonte: Elaborada pelo autor.

O subprocesso relacionado ao acionamento do mecanismo de limpeza é detalhado por meio do fluxograma apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Fluxograma - subprocesso do acionamento do mecanismo de limpeza



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao ser iniciado, dados sobre data, hora e nível de chuva deste acionamento são guardados num arquivo com extensão CSV (*Comma-Separated Values*). O rolo de limpeza se moverá até o limite final imposto pelo sensor indutivo 2, sempre com as cerdas em movimento rotacional. Ao atingir este limite, aguardará três segundos com a intenção de não sobrecarregar os motores. Após esse tempo, os motores são novamente acionados, desta vez um sendo responsável pelo movimento de retorno do rolo de limpeza à posição inicial e o outro pela rotação das cerdas de limpeza. Ao chegar no limite imposto pelo sensor 1, o sistema verifica se o número de repetições proposto pelo usuário foi atingido. Em caso positivo, o processo se repete totalmente. Em caso negativo, o sistema é finalizado e os motores desligados. Por fim, a data e hora do desligamento do sistema são inseridos no arquivo CSV. Este arquivo, que pode ser acesso por meio de aplicações como Bloco de Notas ou Excel (no caso de utilização em plataforma Microsoft) servirá como repositório de dados históricos sobre as limpezas já realizadas no heliostato em questão. O histórico de limpeza do heliostato permite futuras consultas e um maior controle sobre eventuais acionamentos posteriores.

1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por uma questão de organização, os resultados da pesquisa são dispostos de acordo com a ordem estabelecida para os objetivos específicos do trabalho.

Dado que o primeiro objetivo específico definido consiste em determinar os principais métodos existentes para limpeza de superfícies refletoras em usinas CSP, de modo a eleger, dentre as opções, a(s) que melhor(es) se aplica(m) ao exposto neste estudo, considera-se que o levantamento bibliográfico realizado por meio do item 1.2.4, onde apresentou-se informações sobre o fenômeno *soiling*, bem como métodos de limpeza resultantes de pesquisas nos cenários nacional e internacional foi essencial para a consecução do mesmo. Foram apresentados os seguintes estudos em relação à sujidade:

- a) COHEN et al. (1999) e o método de utilização de água em alta pressão aplicado às usinas de calhas parabólicas SEGs III, IV, V, VI e VII, no Deserto Mojave, Estados Unidos;
- b) BURGALETA et al. (2012) e o uso de água pressurizada e caminhões dotados de escovas rotativas para limpeza dos heliostatos da usina de torre central Gemasolar, na Espanha;
- c) ZHANG et al. (2007) e o mecanismo em formato de moldura envolvendo o heliostato, com água limpa borrifada (misturada ou não com detergente) na superfície refletora por meio de um tubo com movimento vertical e escova rotativa com cerdas de borracha movimentando-se também verticalmente para realizar a limpeza da superfície espelhada. Posterior enxague com água limpa e, por fim, a água com os resíduos (poeira, excrementos de pássaros etc.) sendo recolhida pela calha localizada abaixo da superfície refletora;
- d) SENER (2012) e o robô de tamanho pequeno HECTOR (*Heliostat Cleaning Team Oriented Robot*), responsável pela limpeza de superfícies refletoras de heliostatos na PSA (Plataforma Solar de Almería), na Espanha;
- e) VICENTE et al. (2012) e o mecanismo intitulado "PARIS-Autonomus", também desenvolvido pelo SENER, que consiste de um sistema de limpeza aplicado a cilindros parabólicos que faz uso de escovas rotativas umedecidas e sem necessidade de operação por parte de um indivíduo;

- f) FERNÁNDEZ-GARCÍA et al. (2014) e o estudo focado na otimização de métodos de limpeza de refletores solares CSP em condições reais em um clima semidesértico. Apesar de não se tratar de um estudo que objetivava a construção de um mecanismo específico, seus resultados foram de extrema relevância para a elaboração desta tese, principalmente no que diz respeito à opção pela não utilização de detergente para a limpeza dos espelhos do heliostato utilizado como objeto de estudo;
- g) PFAHL et al. (2015b) e o protótipo de mecanismo de limpeza de superfícies espelhadas e moldurado no heliostato, idealizado para ser executado toda vez que os espelhos estiverem úmidos, por meio de uma peça transversa a que se prende uma faixa de borracha, movida pela gravidade;
- h) Os recentes trabalhos de HICKEL et al. (2016) e LEMOS et al. (2016), que, apesar de não abordarem a heliotermia, são importantes contribuições de pesquisas na questão do *soiling* no Brasil. No primeiro caso, avaliou-se o impacto do acúmulo de sujeira em painéis fotovoltaicos (FV) localizados no interior da Bahia e seus efeitos em cinco diferentes tecnologias de módulos FV. Já no segundo caso, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o efeito do acúmulo de sujeira no desempenho de módulos fotovoltaicos. A importância está no fato de destacar que o fator sujeira é comumente negligenciado ou subestimado quando se trata da construção de uma instalações solares;
- i) MIKUSZIES (2015) e a pesquisa voltada à estimativa do volume de água a ser consumido pelo processo de limpeza dos espelhos dos heliostatos em usinas-piloto CSP de torre central a serem construídas em Caiçara do Rio do Vento/RN e de Pirassununga/SP.

Conforme exposto no item 1.3.2, o mecanismo apresentado neste trabalho foi fundamentado em três destes estudos, sendo: a estrutura mecânica com base no trabalho de Zhang et al. (2007); a decisão em utilização da água da chuva para auxiliar o processo de limpeza dos heliostatos foi tomada com base nos resultados da pesquisa elaborada por Mikuszies (2015); e o trabalho de Fernández-García et al. (2014) influenciou a decisão de não utilizar nenhum tipo de detergente ou outras soluções de limpeza no processo.

Em relação ao segundo objetivo específico deste estudo, ou seja, demonstrar o desenvolvimento do dispositivo automatizado para limpeza de superfícies refletoras

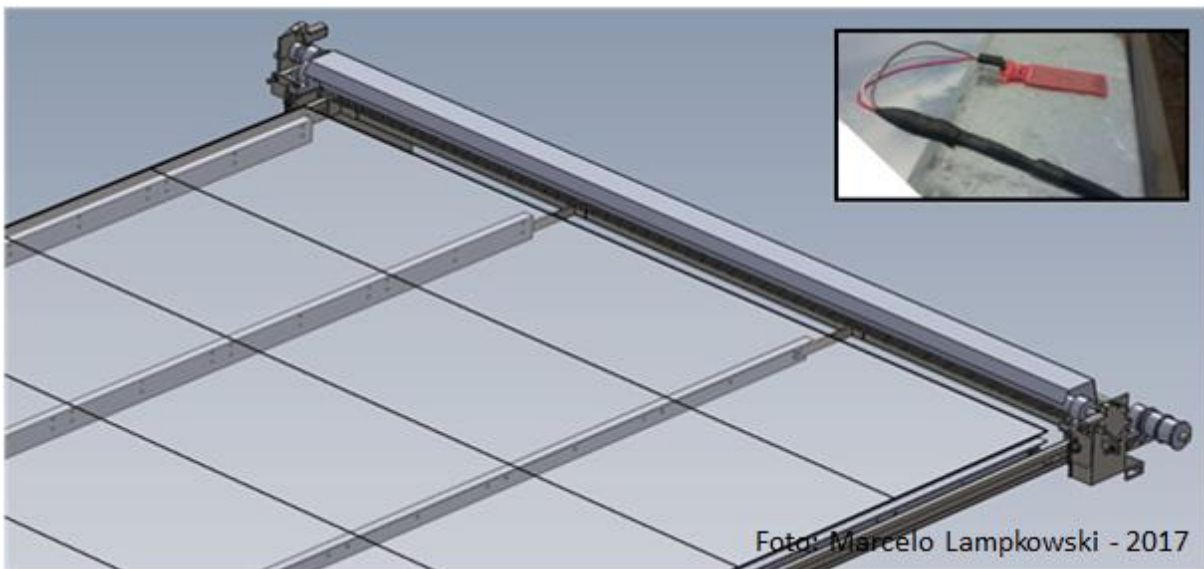
de heliostatos voltado para atuação de acordo com as características climáticas da região de Botucatu-SP, optou-se por detalhar cada uma das partes de seu projeto e funcionamento nos subitens de 1.4.1 até 1.4.3, divididos da seguinte forma: estrutura mecânica; apresentação dos diagramas elétricos; e explicação do algoritmo de programação e operacionalização do sistema.

1.4.1 Estrutura mecânica do dispositivo de limpeza de espelhos em heliostatos

Enquanto não estiver em funcionamento, a maior parcela do mecanismo automático de limpeza fica acomodada na parte superior do heliostato. O objetivo é manter a estrutura longe do chão para que a mesma não venha a atrapalhar a circulação de pessoas e/ou máquinas. Considerando que na posição vertical o heliostato apresenta altura total de 3,90 metros e na posição horizontal 2,40 metros, o dispositivo está mais seguro à qualquer ação danosa.

Nota-se, por meio da Figura 30, que o rolo de limpeza encontra-se protegido por uma chapa galvanizada com três dobras, formando uma espécie de toldo metálico.

Figura 30 - Rolo de limpeza protegido por chapa galvanizada dobrada



A intenção é aumentar a vida útil das cerdas e preservá-las de fenômenos como excesso de sol e correntes de vento. Nesta mesma figura, é destacado o sensor de chuva, posicionado acima do toldo metálico, levemente inclinado para evitar que um acúmulo de água gere um falso sinal de ocorrência de chuva.

A fixação do mecanismo de limpeza no heliostato se dá inteiramente pelo uso de parafusos e utiliza as furações já existentes, sem necessidade de mudanças bruscas em sua estrutura. A Figura 31 apresenta a forma como os parafusos que compõem o heliostato estão dispostos, bem como as diferentes distâncias existentes entre eles, sendo a mínima de 240 mm e a máxima de 545 mm. Além disso, é possível visualizar as estruturas de fixação do mecanismo de limpeza nas laterais e na parte inferior do heliostato.

Figura 31 - Fixação do mecanismo de limpeza no heliostato



Facilitar uma eventual manutenção do dispositivo de limpeza ou mesmo do heliostato foi o que mais influenciou na opção por este modo de fixação. Caso seja necessária, por exemplo, uma troca das superfícies refletoras ou de qualquer outro componente do heliostato, o mecanismo de limpeza pode ser facilmente desmontado.

Nenhum componente foi soldado na estrutura do heliostato. Uma operação de soldagem poderia causar aquecimento da estrutura e afetar danosamente a cola dos

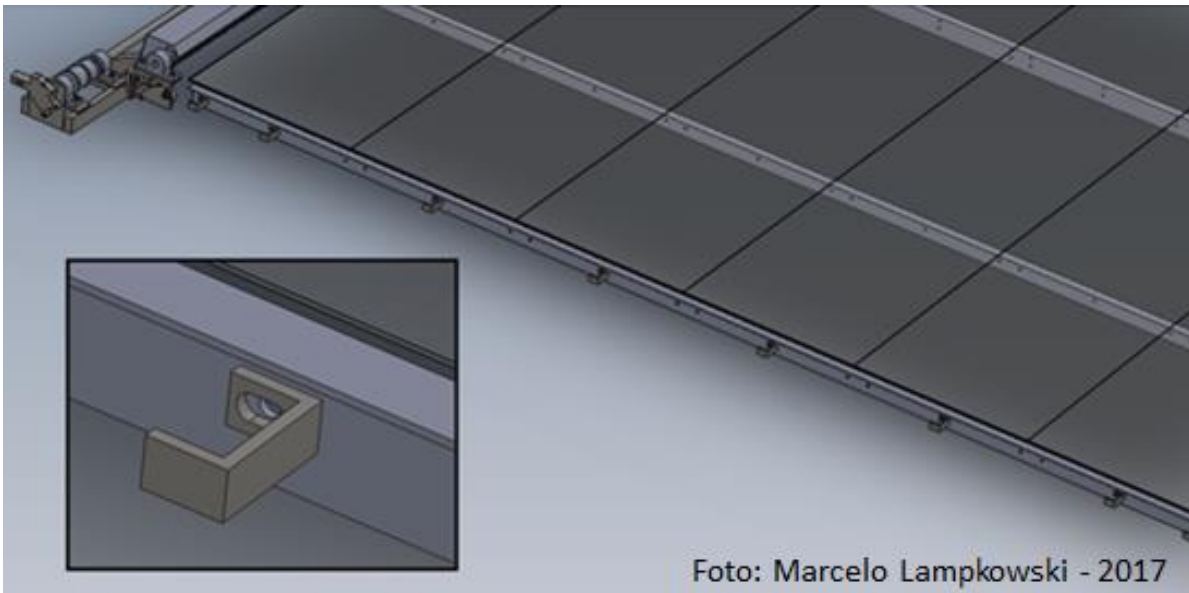
espelhos. Na eventual necessidade de retirada de uma estrutura soldada, o uso de uma esmerilhadeira geraria fagulhas que poderiam riscar as superfícies espelhadas.

A estrutura do mecanismo de limpeza utilizou como material principal perfis dobrados de aço SAE 1020. Esse material mostrou-se viável para o projeto visto seu baixo custo em relação a outros tipos de materiais, vasta disponibilidade no mercado, por apresenta baixo teor de carbono, excelente forjabilidade e ser consideravelmente resistente.

A fixação das partes superior e inferior são feitas por dois tubos de aço (metalon) 30 mm x 50 mm ligados à estrutura do heliostato através de barras chatas dobradas em formato "L". As barras chatas, em suas extremidades, apresentam o furo bilongo que permite um melhor ajuste da mesma na estrutura.

A estrutura das laterais do mecanismo de limpeza é composta de dois perfis dobrados em formato "C" de modo que funcionam como trilhos, permitindo, assim, o deslocamento do conjunto de *trolleys*.

Figura 32 - Laterais do heliostato - pontos de fixação e barras chatas dobradas em formato "U"



A fixação dos perfis dobrados na estrutura do heliostato é feita por meio de barras chatas dobradas em formato "U". Conforme mostrado na Figura 32, são

utilizados oito pontos de fixação em cada lateral, a fim de uma melhor distribuição de peso da estrutura. Reitera-se que serão utilizadas as mesmas furações já existentes do heliostato, sem necessidade de intervenções em suas estruturas laterais.

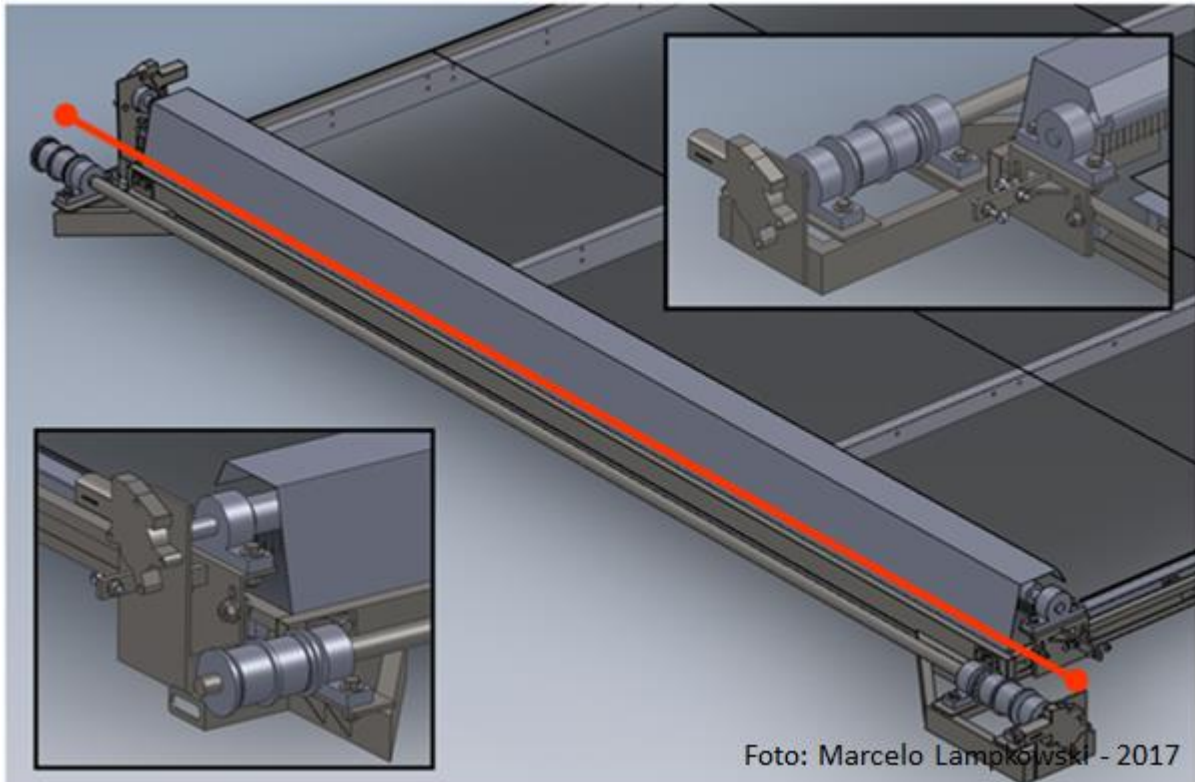
O sistema de movimentação do mecanismo de limpeza, mais especificamente do rolo e da escova, consiste de *trolleys* compostos por duas rodas de nylon cada. Sempre que uma guia de deslocamento é feita, usa-se um material mais resistente e outro mais maleável, objetivando a não ocorrência de travamento do componente. Assim, observa-se, na Figura 33, que um sistema de transmissão através de um eixo (destacado em laranja) é utilizado para garantir o deslocamento uniforme dos conjuntos de *trolleys* em ambos os lados, de modo a evitar o desalinhamento. Esse eixo é suportado por três mancais de rolamento, sendo, o do lado esquerdo do heliostato, dotado de um carretel que encontra-se na extremidade do eixo, seguido de um mancal. No lado direito do heliostato, existe um acoplamento na extremidade do eixo e um tambor entre dois mancais. A função do tambor é acomodar o cabo de aço responsável pela movimentação do *trolley*, de forma que não ocorra sobreposição do cabo. Observa-se que, para isso, o tambor possui uma divisão em seu centro.

Ainda em relação à estrutura existente no lado direito do heliostato, devido à extremidade do eixo ser longa, optou-se pela utilização de dois mancais para melhor apoio.

A inexistência deste sistema de transmissão através de um eixo poderia acarretar o travamento do rolo de limpeza no processo de deslocamento.

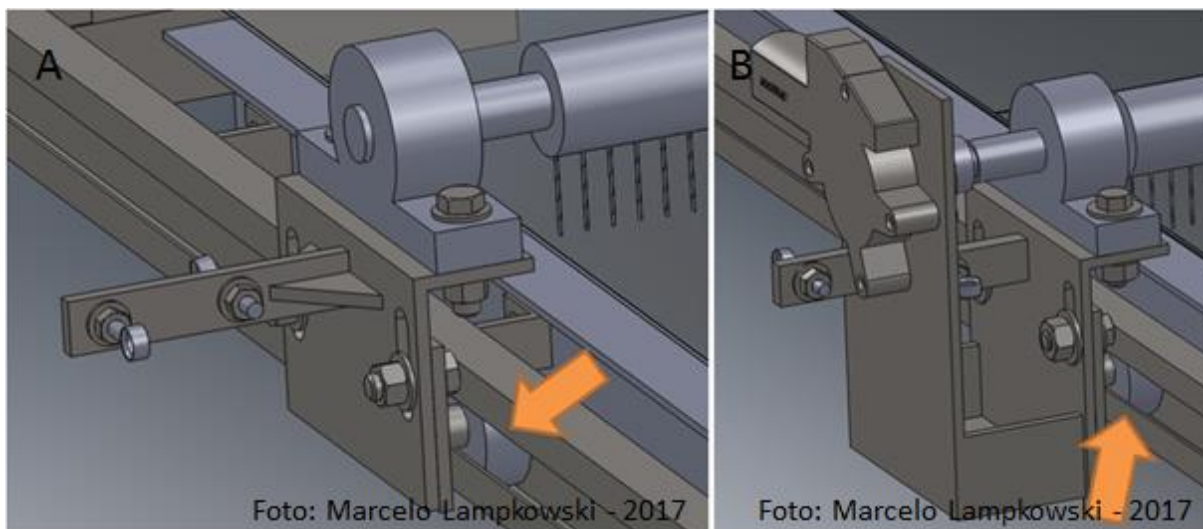
O mecanismo proposto faz uso de dois motores, destacados também na Figura 33. O primeiro está fixado na parte superior direita do heliostato e é responsável pelo deslocamento dos *trolleys*, que por sua vez, faz o movimento de avanço e retorno do rolo de limpeza. O segundo está fixado no *trolley* do lado esquerdo do heliostato e realiza o movimento de giro do rolo de limpeza.

Figura 33 - Sistema de transmissão por eixo e posição dos motores componentes do sistema



Conforme mostrado na Figura 34, o *trolley* posicionado do lado direito (item A) serve como apoio de um dos mancais do rolo de limpeza. Esse *trolley* possui um sistema que permite o ajuste da altura das cerdas e o contato da mesma com as superfícies espelhadas. Com o decorrer do tempo, as cerdas se desgastarão e não atingirão a superfície dos espelhos com tanta eficácia. A fim de se aumentar a vida útil do rolo de limpeza, esse sistema permite a regulagem da altura do rolo para um maior contato das cerdas com os espelhos. Considerando que as cerdas possuem 30 mm de comprimento, esse sistema possibilita ajustá-las num limite de até 15 mm. Além disso, é possível observar a existência de dois esticadores para o cabo de aço.

Figura 34 - Trolleys componentes do mecanismo de limpeza



O *trolley* posicionado do lado esquerdo do heliostato (Figura 35, item B) possui um apoio para o outro mancal do rolo de limpeza, bem como o motor de acionamento do movimento de rotação do rolo. O motor acompanha o movimento de avanço e retrocesso do rolo de limpeza, girando o mecanismo. O sistema de ligação entre o eixo da escova e o motor é feito por acoplamento. Considerando o fator uniformidade da regulagem de altura, este *trolley* é dotado do mesmo sistema de ajuste de altura que o posicionado do lado direito. Assim como no lado apostado, observa-se a presença de dois esticadores para o cabo de aço.

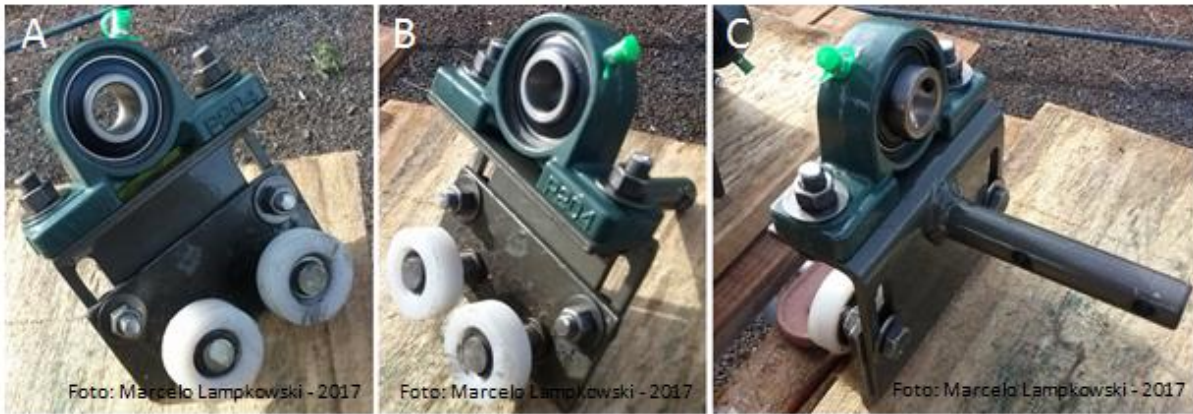
Em ambos os casos, faz-se uso do mancal UC204 com diâmetro interno de 20 mm.

Ainda na Figura 34, observa-se, as rodas de nylon do *trolley*, indicadas por setas laranjas, que se deslocarão dentro do perfil dobrado em "C".

Os dois *trolleys* desenvolvidos podem ser melhor visualizados nas próximas figuras. Previne-se que, em ambos os casos, as estruturas são apresentadas sem os esticadores de cabos de aço acoplados.

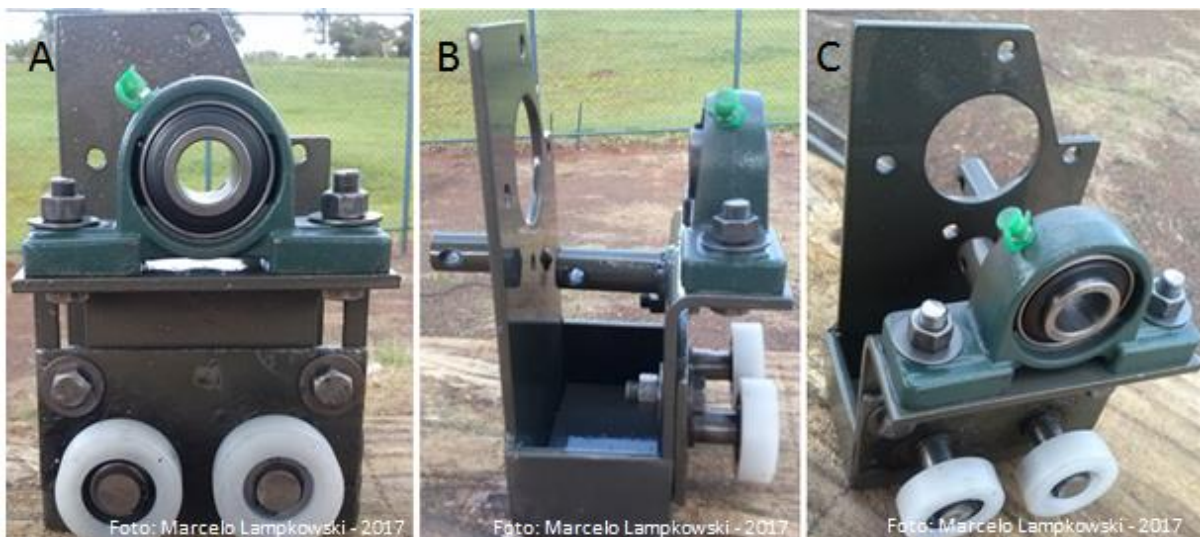
A Figura 35 apresenta o *trolley* que fica localizado no lado direito do heliostato, em três ângulos diferentes, respectivamente itens A, B e C. Sua estrutura é mais simples se comparado ao *trolley* que se localiza no lado esquerdo do heliostato. Isso se deve ao fato de que ele não acondicionará nenhum motor.

Figura 35 - Trolley localizado no lado direito do heliostato



O *trolley* que fica situado no lado esquerdo do heliostato aparece em três ângulos diferentes na Figura 36, sendo estes marcados pelos itens A, B e C. Observa-se que sua estrutura é um pouco mais complexa do que a do outro *trolley* componente do dispositivo de limpeza, devido ao fato de que ele necessita estar adaptado ao peso e às furações do motor que acompanhará seu movimento. Destaca-se que houve o cuidado de se efetuar pequenos furos em sua base para que não ocorra acúmulo de água em seu interior.

Figura 36 - Trolley localizado no lado esquerdo do heliostato



Na parte inferior do heliostato, estão posicionados conjuntos de roldanas que assistem no deslocamento do cabo de aço, mais especificamente nos movimentos

de avanço e retorno, conforme apresentado na Figura 37. As roldanas formam um mecanismo que mantém tensionados os cabos de aço. Trata-se de um sistema de contrapeso apoiado por duas roldanas. Este contrapeso possui 4 Kg de massa e foi confeccionado em chumbo devido à sua elevada massa específica (11.300 Kg/m^3), obtendo-se, assim, um volume reduzido. Seu deslocamento ocorre apenas na vertical.

Ainda na Figura 37, observa-se que foi tomado o devido cuidado em inserir no mecanismo uma quinta roldana (indicada pela seta laranja) a fim de se manter o cabo de aço sempre tensionado, mesmo quando o heliostato estiver em inclinação máxima em relação ao seu eixo vertical. Ressalta-se que, independente da movimentação do heliostato, o contrapeso mantém-se sempre na vertical, evitando, assim, que o cabo de aço solte-se da roldana.

Figura 37 - Parte inferior do mecanismo e roldanas de apoio



Foto: Marcelo Lampkowski - 2017

O sistema faz uso de cabos de aço 6x7 vias, com 1/16" de diâmetro e que possuem revestimento para proteção contra extremos de condições climáticas. O deslocamento por cabo de aço utiliza, na parte inferior, roldanas de apoio e mecanismo de tensionamento nos lados direito e esquerdo. Na parte superior, são

usados dois carretéis para enrolar e desenrolar os cabos e, nesse caso, os carretéis são mais largos do que as roldanas de apoio, pois acondicionam os cabos de aço.

O sistema de deslocamento dos *trolleys* é feito por meio de quatro cabos de aço, sendo dois de um lado e dois do outro. O objetivo de se utilizar dois cabos em cada lado é mantê-los tensionados a fim de garantir a uniformidade no deslocamento do *trolley*.

Considerando a descrição de um único lado, já que ambos são estruturados de forma idêntica, um cabo tem uma de suas extremidades fixada no *trolley* e a outra extremidade enrolada no carretel, como apresenta a Figura 38. Já em relação ao outro cabo, uma de suas extremidades é presa ao *trolley*, passa pelas roldanas de apoio e do mecanismo de tensionamento para, posteriormente, ser conectada no carretel. Assim, quando o sistema está em funcionamento, um dos cabos é enrolado e o outro, desenrolado. Também, na Figura 38, é possível observar a utilização de abraçadeiras (grampos) para fixação das extremidades dos cabos nos esticadores.

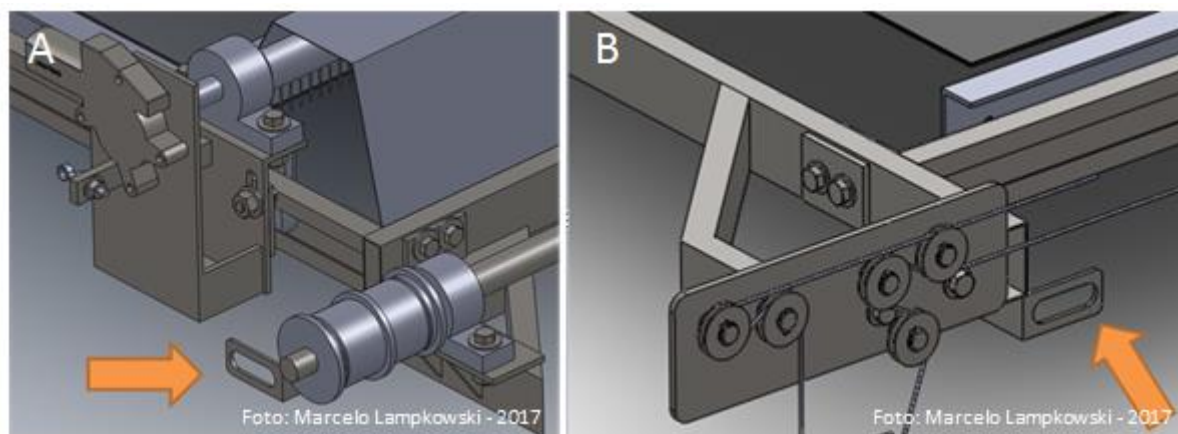
Figura 38 - Forma de conexão dos cabos de aço



Sensores indutivos são utilizados para limitar a distância a ser percorrida pelo rolo de limpeza. São posicionados no lado esquerdo superior e no lado esquerdo inferior da estrutura.

Conforme mostrado na Figura 39, esses sensores indutivos são suportados por uma barra chata de aço dobrada em formato "L", com espessura 1/8". O uso de bilongos indicados nos itens A e B se justifica em razão do ajuste da área de atuação do sensor indutivo.

Figura 39 - Posicionamento dos sensores indutivos



O mecanismo de limpeza proposto neste trabalho tem como um de seus principais componentes uma escova com base em polipropileno dotada de cerdas de nylon de 0,15 mm de espessura e 30 mm de altura. A escova possui 2567 mm de comprimento; e base com 40 mm de diâmetro externo e 26 mm de diâmetro interno.

Por razão de limitações de maquinário por parte da empresa fornecedora, esse componente precisou ser fabricado em três partes, sendo cada uma com comprimento de 860 mm, destacadas na Figura 40, a seguir.

Figura 40 - Escova de limpeza dividida em três partes



As escovas foram fixadas em um tubo de aço carbono de 1", com comprimento total de 2.989 mm e, para tal, foram utilizados dois pinos elásticos 3x40 mm em cada parte da escova, totalizando seis unidades.

Ressalta-se que o peso total do dispositivo é de aproximadamente 28 quilogramas distribuídos, o que não afeta a estrutura do heliostato. Já está considerado neste valor, a massa dos dois contrapesos.

1.4.1.1 Necessidade de adaptação na estrutura mecânica

Após os testes preliminares do mecanismo de limpeza de superfícies refletoras do heliostato, verificou-se a necessidade da readequação no sistema de fixação dos sensores indutivos, de modo a tornar os seus respectivos acionamentos mais eficazes.

Para tal, fez-se o uso de chapas de aço carbono com espessura de 1,5 mm e, para fixação das mesmas, parafusos com 5/16" de diâmetro e comprimento de 1/2" e porcas com 5/16" diâmetro, conforme mostrado na Figura 41.

Figura 41 - Adaptação dos sensores indutivos



Observou-se, após essa adaptação maior confiabilidade no funcionamento dos sensores indutivos.

1.4.2 Diagramas elétricos do dispositivo de limpeza de espelhos em heliostatos

A Figura 42 apresenta o circuito motriz do mecanismo automatizado que fará a limpeza dos espelhos que compõem o heliostato.

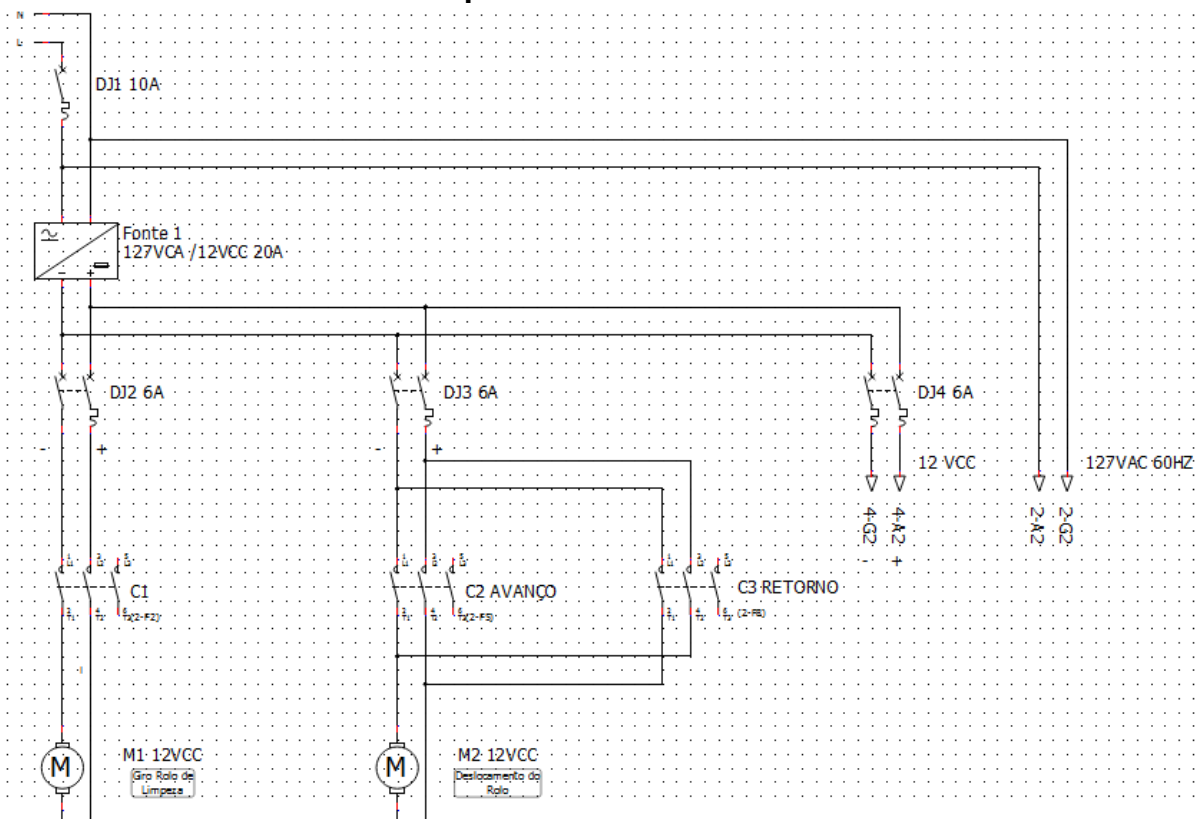
O sistema é iniciado por uma alimentação de 127 VCA/60 Hertz, que é o padrão da rede elétrica brasileira, proveniente do conjunto formado por painéis fotovoltaicos e baterias existente no Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp de Botucatu. A tensão passa pelo disjuntor 1 (DJ1) - unipolar e com corrente 10 A - é retificada por uma fonte de 12 VCC de tensão e com corrente igual a 20 A. Em seguida, essa tensão passa pelo disjuntor 2 (DJ2) - unipolar e com corrente 6A -, alimentando os contatos principais do contator 1 (C1). O acionamento de C1 faz com que seja ligado o motor 1 (M1) com 12 VCC. Esse motor é responsável pela rotação do rolo de limpeza e o movimento ocorrerá sempre em um único sentido.

Ainda, a partir dos 12 VCC da fonte, a tensão deve passar pelo disjuntor 3 (DJ3) - unipolar e com corrente igual a 6A -, alimentando os contatos principais dos contadores 2 e 3 (representados por C2 e C3, respectivamente). C2 é o que aciona o

motor 2 (M2) responsável pelo movimento de avanço do rolo de limpeza e C3 proporciona o movimento de retorno, com base no mesmo motor.

Nota-se, portanto, que os contatores C2 e C3 serão acionados sempre em momentos diferentes, ou seja, nunca simultaneamente, por razão da inversão de polaridade do motor para efetuar a mudança de sentido do giro do mesmo, o que influencia o sentido de movimentação do rolo de limpeza, proporcionando avanço ou retorno.

Figura 42 - Circuito motriz do dispositivo de limpeza dos espelhos componentes do heliostato



Fonte: Elaborada pelo autor.

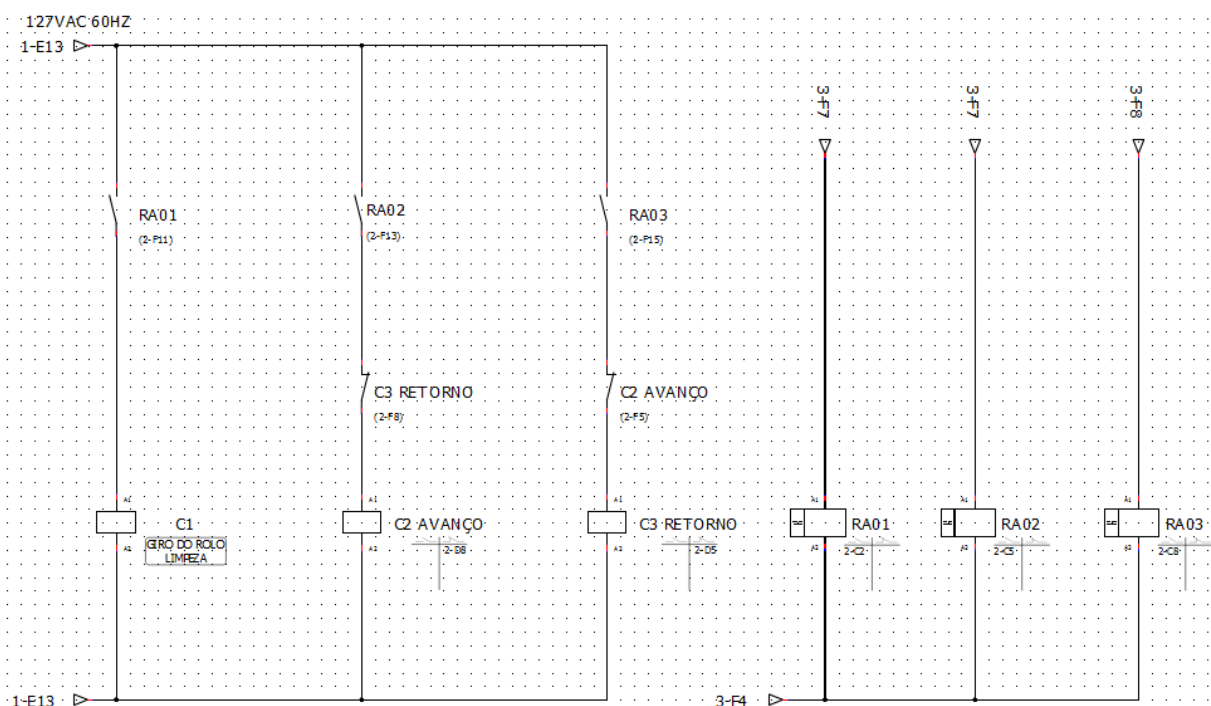
É possível observar, ainda na Figura 42, a inversão de polaridade nos terminais de saída dos contatores C2 e C3, onde o negativo de C2 (que é o terminal 2) é ligado ao terminal positivo 4 de C3. Em contrapartida, o terminal positivo 4 de C2 é ligado ao terminal negativo 2 de C3.

Em relação aos disjuntores, DJ1 possui corrente elétrica igual a 10 A, enquanto os disjuntores DJ2 e DJ3 possuem valores de corrente igual a 6 A cada, totalizando

12 A. Isso se justifica pelo fato de que, de acordo com os dados do fabricante dos motores, a corrente nominal de cada um deles é de 6 A. O disjuntor 4 (DJ4) é responsável pela alimentação do circuito de sensores indutivos e poderá ser utilizado para eventuais expansões no sistema. Observa-se, também, uma saída de alimentação em 127 VCA para o circuito de comando dos motores.

A Figura 43 apresenta o circuito de comando dos motores que irão compor o sistema.

Figura 43 - Circuito de comando dos motores



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o objetivo de realizar o movimento de rotação da escova de limpeza, a Porta 2 (P2) do Arduino envia +5V para o Rele Auxiliar 01 (RA01) que, por sua vez, liga o Contator 1 (C1) através do envio de 127V para a bobina deste contator. Assim, C1 faz funcionar o Motor 1 (M1).

O movimento de avanço da escova de limpeza utiliza a Porta 3 (P3) do Arduino que envia +5V para o Rele Auxiliar 02 (RA02). Assim, RA02 aciona o Contator 2 (C2) que liga o Motor M2.

O movimento de retorno do rolo de limpeza utiliza a Porta 4 (P4) do Arduino, que aciona, por meio do envio de +5V, o Rele Auxiliar 03 (RA 03). Posteriormente, RA03 envia 127V para a bobina do Contator 3 (C3) e o mesmo liga o Motor 2 (M2).

Ainda, na Figura 43, é possível notar o intertravamento eletromecânico entre os contadores C2 e C3.

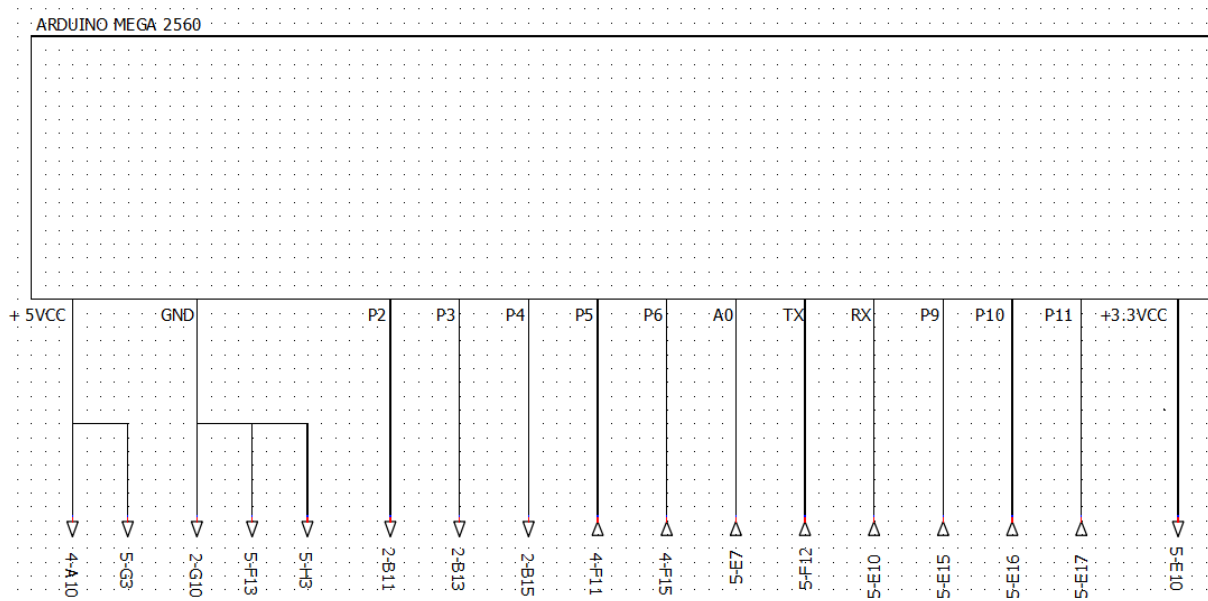
A Figura 44 representa as portas do Arduino que serão utilizadas para controle do dispositivo automático de limpeza dos espelhos que formam o heliostato.

Entende-se que as portas são os recursos principais para o microcontrolador interagir com demais componentes ou objetos exteriores. O Arduino é formado por portas digitais e analógicas. No caso do modelo ATmega2560, são 54 portas de entradas e saídas digitais onde 15 destes podem ser utilizados como saídas do tipo *Pulse Width Modulation* (PWM ou Modulação por Largura de Pulso), técnica para obter resultados analógicos por meios digitais. Possui também 16 portas de entrada analógicas.

Sobre as portas digitais, no caso da interação com objetos e dispositivos externos, as mesmas têm a capacidade de trabalhar com variáveis discretas digitais, como, por exemplo, dois dígitos (0 ou 1; HIGH ou LOW, no caso 0V e 5V), de tal forma que o microcontrolador pode identificar se uma chave foi acionada ou não, no caso de uma porta digital estar configurada como entrada. Pode, também, acionar um dispositivo, como, por exemplo, ligar ou desligar um motor, quando a porta digital estiver configurada como saída.

Por meio das portas de entradas digitais é possível aplicar uma lógica discreta para controle de projetos. Porém, em muitas situações a variação das grandezas envolvidas acontece de forma analógica. Assim, outra forma de o microcontrolador interagir com sensores ou objetos externos é pela leitura e/ou geração desses sinais contínuos, ou seja, que variam continuamente em relação ao tempo e podem assumir infinitos valores dentro de uma faixa, como, por exemplo, temperatura do ambiente ou de um corpo ou mesmo do nível de água num recipiente. Nestes casos, portanto, faz-se uso das portas analógicas.

Figura 44 - Portas de entrada e saída do Arduino



Fonte: Elaborada pelo autor.

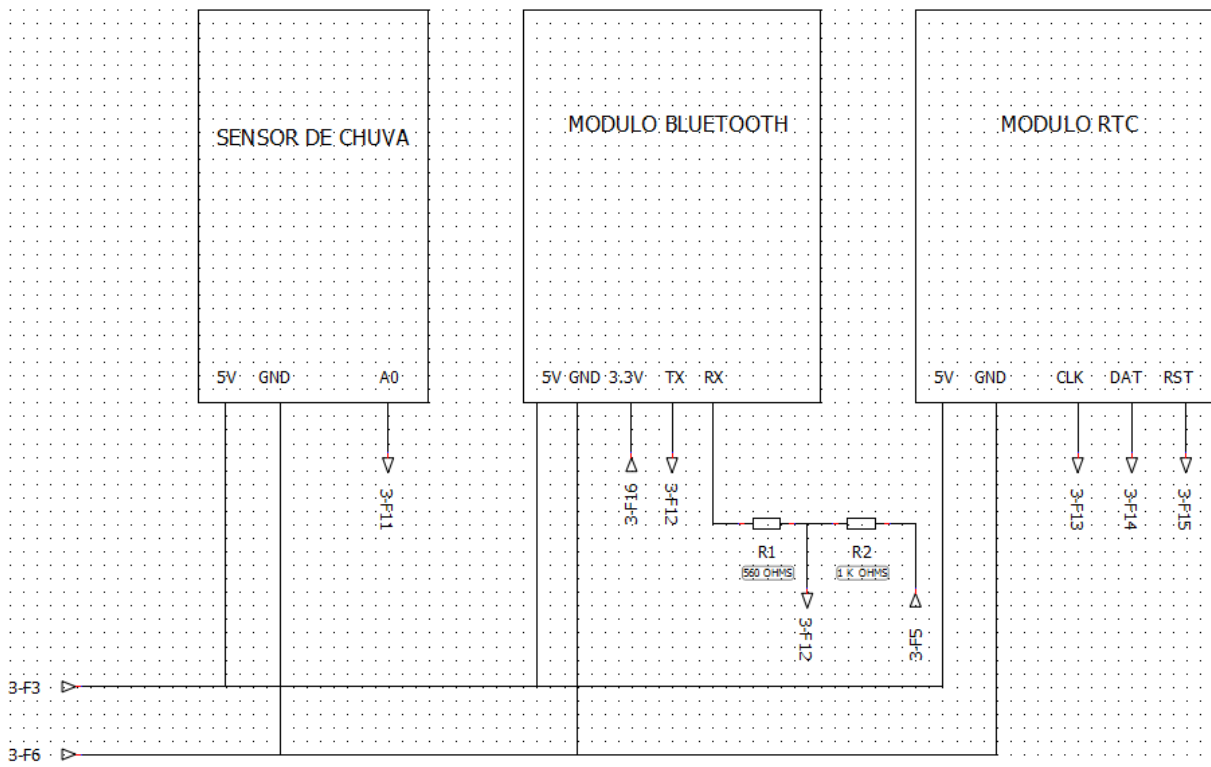
Na Figura 44, observa-se que as portas de saída P2, P3 e P4 estão diretamente relacionadas com o acionamento dos motores, sendo P2 aquela referente ao motor que fará o movimento de rotação da escova de limpeza e as portas P3 e P4 são relativas aos movimentos de avanço e retorno, respectivamente, do sistema de limpeza. As portas P5 e P6 referem-se ao recebimento de sinal dos sensores indutivos. As portas P9, P10 e P11 são responsáveis pela leitura dos sinais vindos do módulo RTC, sendo que P9 está ligada ao pino *clock* deste módulo; P10 está conectada ao pino *data* do módulo RTC; e P11 ao pino *rst*. Uma porta analógica A0 também é utilizada e sua função é receber os sinais do sensor de chuva componente do mecanismo. Nas portas RX e TX representadas, encontram-se conectados terminais responsáveis pela recepção e transmissão de dados do módulo Bluetooth HC-05. Além disso, estão representadas as portas de alimentação de 5VCC e 3,3 VCC, bem como a porta de referência GND (terra).

A Figura 45 representa o sensor de chuva e os módulos atuadores Bluetooth HC-05 e RTC.

O sensor de chuva para Arduino é composto por duas partes: a placa do sensor, formada por várias trilhas resistentes à oxidação, que vão detectar o nível de líquido que está atingindo a placa, e o módulo com chip comparador, que é o responsável

por ler as informações desse sensor e enviar os dados pela saída analógica, no caso, A0. Esse sensor é alimentado com 5 VCC e ainda destaca-se a existência do pino de referência (GND ou terra).

Figura 45 - Diagramas elétricos dos sensores e atuadores



Fonte: Elaborada pelo autor.

O módulo *Bluetooth* HC-05 possui cinco pinos, sendo: pino "key", ligado ao 3,3 VCC, necessário para que o módulo entre em modo de configuração; os pinos TX, que faz a transmissão de dados, e RX, que recebe dados, ligados de maneira cruzada com o Arduino, pois o que um transmite, o outro deve receber; a alimentação com 5VCC e o pino de referência GND.

O nível lógico das portas RX e TX é de 3,3V, o que significa que, para o ligar o módulo HC-05 ao Arduino, será necessário um divisor de tensão no pino RX para evitar a queima do módulo, pois o Arduino trabalha com nível de sinal de 5V. Assim, nota-se a utilização de dois resistores (R1 e R2), com valores 560 ohms e 1000 ohms, respectivamente. Considerando que:

$$V_{out} = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) * V_{in}, \text{ sendo:}$$

- V_{out} , o valor da tensão de saída;
- R_2 , o valor do resistor 2 (no caso, 1000 ohms);
- R_1 , o valor do resistor 1 (no caso, 560 ohms);
- V_{in} , o valor da tensão de entrada (no caso, 5V);

Portanto, o valor encontrado para a tensão de saída foi 3,205V, ou seja, menor que 3,3 V.

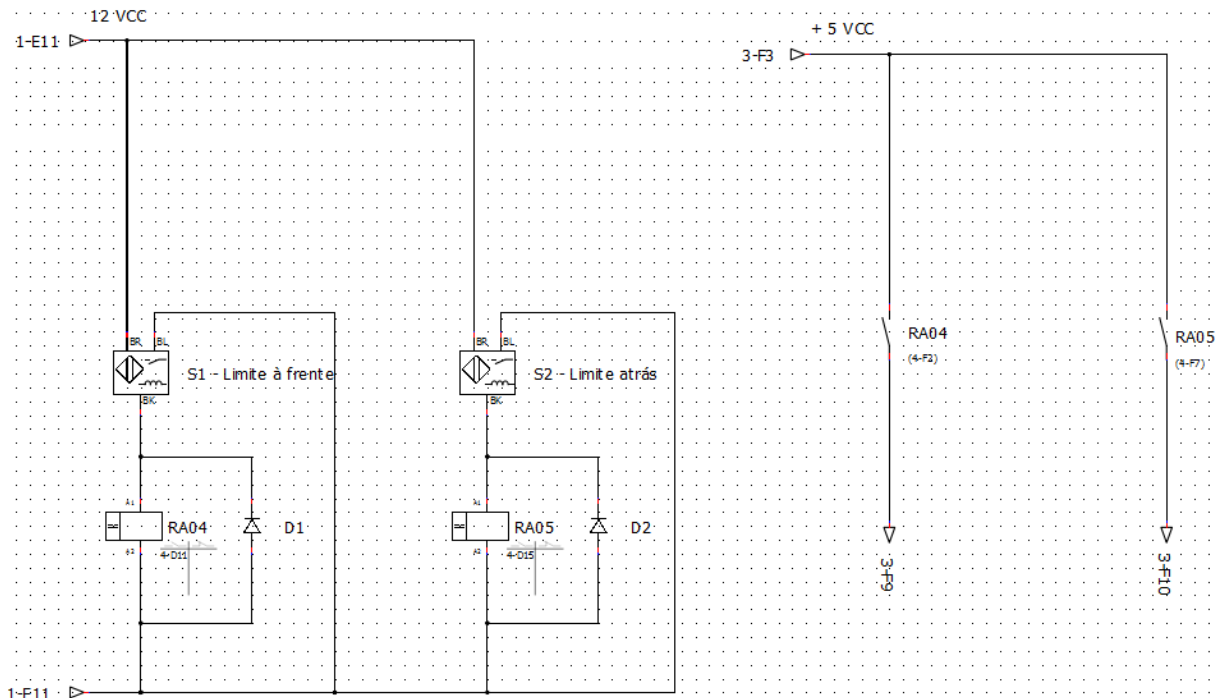
Sobre o RTC, como já visto, as portas P9, P10 e P11 são responsáveis pela leitura dos sinais vindos deste módulo, sendo que P9 está ligada ao pino *clock*, que controla o fluxo de dados; P10 está conectada ao pino *data*, que é por onde os dados são enviados e recebidos (I/O ou *Input/Output*), através de um registrador de deslocamento (*shift register*); e P11 ao pino *rst*, que habilita ou não a transmissão e recepção de dados. O módulo RTC é alimentado por uma tensão de 5VCC e, na mesma figura, está representado seu pino de referência (GND).

A Figura 46 apresenta o diagrama elétrico relacionado ao funcionamento dos sensores indutivos que irão compor o sistema.

É possível observar que a tensão de 12 VCC proveniente do Disjuntor 4 (DJ4) alimenta os sensores indutivos S1 e S2, sendo o primeiro responsável pelo limite à frente e o seguinte pelo limite atrás. Isso delimita o percurso da escova de limpeza.

Ambos os sensores possuem chaveamento do tipo Normal Aberto (NA), além de três fios, sendo que os transistores utilizados no circuito amplificador são do tipo PNP, o que estabelece que a ligação seja feita pelo fio de potencial positivo. Os sensores trabalham com alimentação de 6 a 36 VCC e possuem diâmetro de 12 mm. Quando S1 é acionado, envia 12 VCC para o Rele Auxiliar 04 (RA04). No caso do acionamento de S2, este liga o Rele Auxiliar 5 (RA05).

Figura 46 - Funcionamento dos sensores indutivos



Fonte: Elaborada pelo autor.

No diagrama apresentado na Figura 46, à direita, nota-se uma alimentação de 5VCC proveniente do Arduino. Trata-se da alimentação dos contatos normais abertos dos relês RA04 e RA05. O contato aberto de RA04, quando acionado, envia 5 VCC para a Porta 5 (P5) do Arduino, iniciando a lógica computacional previamente introduzida no mesmo, indicando o limite à frente da escova de limpeza. O contato aberto de RA05, quando acionado, também envia 5 VCC, porém para a Porta 6 (P6) do Arduino, iniciando a programação disponibilizada no dispositivo, indicando o limite atrás da escova de limpeza. Em ambos os sensores, as leituras são realizadas em intervalos de 0,1 segundo.

Ressalta-se que uma melhor visualização e compreensão dos diagramas elétricos será possível por meio do Apêndice 1.

1.4.3 Programação (algoritmo) e operação do sistema

Um algoritmo, ou simplesmente programa, é uma forma de dizer a um computador (no caso, um microcontrolador) o que ele deve fazer, ou seja, é um

conjunto sequencial de instruções desenvolvidas que são enviadas para a máquina visando com que as ações da mesma sigam rigorosamente esses passos definidos. Os algoritmos normalmente são escritos em linguagens de programação de alto nível. A linguagem de programação utilizada no Arduino é a baseada em C++, com pequenas modificações.

A Tabela 8, a seguir, apresenta o código-fonte completo desenvolvido para movimentação do mecanismo automatizado que fará a limpeza dos espelhos que integram o heliostato.

Num primeiro instante, nota-se o uso de uma biblioteca chamada *virtuabotixRTC*. Como foi feita a opção pela utilização de um módulo RTC DS1302 (*Real Time Clock* ou Relógio em Tempo Real), essa biblioteca facilita a extração das informações do DS1302 e o uso das mesmas junto às outras funções do Arduino.

Em seguida, são definidas as constantes e variáveis componentes do sistema, sendo elas relacionadas às portas de comunicação do Arduino que estão sendo utilizadas ou aos espaços da memória interna do Arduino que são utilizados para gravação de dados, sendo:

- a) *sensorChuva*: constante do tipo inteiro que tem seu valor definido como A0, fazendo referência à porta analógica número 0 do Arduino;
- b) *qtd_chuva*: variável que armazena valores inteiros e utilizada para guardar o valor da quantidade de chuva detectada pelo sensor, ou seja, um valor entre 0 e 700;
- c) *virtuabotixRTC myRTC(9, 10, 11)*: relacionado ao módulo RTC, determina os pinos os quais o módulo está conectado, sendo, no caso deste projeto, *clock = 9*, *data = 10* e *rst = 11*;
- d) *Porta2*: refere-se à porta digital número 2, que controla o movimento de rotação do rolo de limpeza;
- e) *Porta 3*: comunicação com a porta digital número 3, incumbida do movimento de avanço do rolo de limpeza;
- f) *Porta 4*: relacionada ao movimento de retorno do rolo de limpeza à posição inicial;

- g) Porta 5: refere-se à porta digital número 5, que intermedeia a comunicação do Sensor Indutivo 1 (delimitador da posição de início do rolo de limpeza) com o Arduino;
- h) Porta 6: porta digital responsável pela comunicação entre o Arduino e o Sensor Indutivo 2, que delimita o ponto de avanço do rolo de limpeza (máxima posição final) e que envia o comando para que o mesmo retorne à sua posição inicial;
- i) acionamento: variável do tipo string que tem como objetivo realizar a leitura mais recente no *buffer* da comunicação serial;
- j) caractere: variável que acomoda os valores das teclas pressionadas pelo usuário, sendo uma por vez;
- k) qtdchar: assim como no caso da variável "caractere", auxilia na divisão dos valores das teclas pressionadas, sendo usada, principalmente para armazenar valores auxiliares em momentos oportunos;
- l) qtd: variável do tipo inteiro, iniciada com valor igual a zero. Visa controlar o número de repetições dos movimentos de limpeza;
- m) cont: assim como a variável qtd, serve como um contador para armazenar o número de repetições de limpeza executadas a cada acionamento;
- n) sensor1: refere-se ao status (0 ou 1; HIGH ou LOW) do Sensor Indutivo 1 (delimitador da posição de início do rolo de limpeza);
- o) sensor2: refere-se ao status (0 ou 1; HIGH ou LOW) do Sensor Indutivo 1 (delimitador da posição de início do rolo de limpeza).

Tabela 8 - Código-fonte - programação do sistema

```

#include <virtuabotixRTC.h>
const int sensorChuva = A0;
int qtd_chuva = 0;
virtuabotixRTC myRTC(9, 10, 11);
const int Porta2 = 2;
const int Porta3 = 3;
const int Porta4 = 4;
const int Porta5 = 5;
const int Porta6 = 6;
String acionamento = "";
char caractere;
char qtdchar;
int qtd = 0;
int cont = 0;

```

```
int sensor1 = 0;
int sensor2 = 0;

void setup()
{
  pinMode(Porta2,OUTPUT);
  pinMode(Porta3,OUTPUT);
  pinMode(Porta4,OUTPUT);
  pinMode(Porta5,INPUT);
  pinMode(Porta6,INPUT);
  pinMode(sensorChuva, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  // (segundos, minutos, hora, dia da semana, dia do mes, mes, ano)
  myRTC.setDS1302Time(00, 32, 1, 7, 14, 1, 2017);
  digitalWrite(Porta2, HIGH);
  digitalWrite(Porta3, HIGH);
  digitalWrite(Porta4, HIGH);
}

void mostrar_data()
{
  myRTC.updateTime();

  if (myRTC.dayofmonth < 10)
  {
    Serial.print("0");
  }

  Serial.print(myRTC.dayofmonth);
  Serial.print("/");

  if (myRTC.month < 10)
  {
    Serial.print("0");
  }

  Serial.print(myRTC.month);
  Serial.print("/");
  Serial.print(myRTC.year);
  Serial.print("; ");

  if (myRTC.hours < 10)
  {
    Serial.print("0");
  }

  Serial.print(myRTC.hours);
  Serial.print(":");

  if (myRTC.minutes < 10)
```

```
    {
      Serial.print("0");
    }

    Serial.print(myRTC.minutes);
    Serial.print(":");

    if (myRTC.seconds < 10)
    {
      Serial.print("0");
    }

    Serial.print(myRTC.seconds);
  }

void limpeza(int qtd)
{
  while(qtd > cont)
  {
    cont = cont + 1;
    mostrar_data();
    Serial.print("; Ciclo (");
    Serial.print(cont);
    Serial.print(" de ");
    Serial.print(qtd);
    Serial.print(") iniciado; ");
    Serial.print(qtd_chuva);
    Serial.print("; ");
    Serial.print(acionamento);

    sensor1 = digitalRead(Porta5);
    sensor2 = digitalRead(Porta6);

    while(sensor2 != 1)
    {
      digitalWrite(Porta2, LOW);
      digitalWrite(Porta3, LOW);
      digitalWrite(Porta4, HIGH);
      sensor1 = 0;
      sensor2 = digitalRead(Porta6);
      delay(100);

      if(sensor2 == 1)
      {
        digitalWrite(Porta2, HIGH);
        digitalWrite(Porta3, HIGH);
        digitalWrite(Porta4, HIGH);
        delay(3000);
      }
    }
  }
}
```

```
        while(sensor1 != 1)
        {
            digitalWrite(Porta2, LOW);
            digitalWrite(Porta3, HIGH);
            digitalWrite(Porta4, LOW);
            sensor2 = 0;
            sensor1 = digitalRead(Porta5);
            delay(100);

            if(sensor1 == 1)
            {
                digitalWrite(Porta2, HIGH);
                digitalWrite(Porta3, HIGH);
                digitalWrite(Porta4, HIGH);
                delay(3000);
            }
        }
        Serial.println();
    }
}

void loop()
{
    myRTC.updateTime();
    qtd_chuva = analogRead(sensorChuva);

    if (qtd_chuva > 0 && qtd_chuva < 200)
    {
        mostrar_data();
        Serial.print("; Sem chuva/Insuficiente; ");
        Serial.print(qtd_chuva);
        Serial.print("; ");
    }

    while(Serial.available() > 0)
    {
        caractere = Serial.read();

        if (caractere != '\n')
        {
            acionamento.concat(caractere);
        }

        delay(10);
    }

    Serial.print(acionamento);
    if (acionamento == "")
    {
        Serial.print("s0");
    }
}
```

```
    }

    Serial.println();

}

else
{
    mostrar_data();
    Serial.print("; Chuva detectada; ");
    Serial.print(qtd_chuva);
    Serial.print("; Para acionar o dispositivo de limpeza, digite 'S' ou 's',
seguido do numero de repeticoes do processo - de 1 até 5 vezes (Ex.: s3).; ");

    if (acionamento == "")
    {
        Serial.print("s0");
    }

    Serial.println();

    while(Serial.available() > 0)
    {
        caractere = Serial.read();

        if (caractere != '\n')
        {
            acionamento.concat(caractere);
        }
        delay(10);
    }

    if (acionamento == "s1" || acionamento == "S1" || acionamento == "s2"
|| acionamento == "S2" || acionamento == "s3" || acionamento == "S3" ||
acionamento == "s4" || acionamento == "S4" || acionamento == "s5" || acionamento
== "S5")
    {

        qtdchar = acionamento.charAt(1);

        switch(qtdchar)
        {
            case 49:
                qtd = 1;
                break;
            case 50:
                qtd = 2;
                break;
            case 51:
                qtd = 3;
```

```
break;
case 52:
qtd = 4;
break;
case 53:
qtd = 5;
break;
}

limpeza(qtd);
mostrar_data();
Serial.print("; Limpeza encerrada; ");
Serial.print(qtd_chuva);
Serial.flush();
acionamento = "";
qtd = 0;
cont = 0;

if (acionamento == "")
{
Serial.print("; s0");
}

Serial.println();
}

}
```

```
delay(10000);
}
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

A função void Setup() é executada uma única vez ao ligar ou reiniciar o Arduino, ou seja, quando a placa é energizada ou cada vez que a mesma é reiniciada e retorna às suas configurações originais. Nesta função, são definidos os parâmetros iniciais do programa. Ela é utilizada para inicializar variáveis, definir o *PinMode* (tipo de função que exercerá uma porta/pino, sendo entrada - *input* - ou saída - *output*) e referenciar o uso de bibliotecas. Neste caso, a função void Setup() foi usada para configurar os pinos 2, 3 e 4 como saída, ou seja, como responsáveis pelo envio de dados do Arduino para os atuadores nele conectados. Já as portas 5 e 6 são ajustadas como entradas, assim como a porta analógica 0, onde está conectado o sensor de chuva, recebendo sinais do sensores e repassando-os ao

microcontrolador. Os pinos configurados como *input* estão em um estado de alta impedância, o que faz com que eles sejam úteis para ler o valor de um sensor. Os pinos configurados como *output* estão em um estado de baixa impedância, ou seja, eles podem fornecer uma corrente elétrica de até 40 mA (miliamperes) para outros circuitos ou dispositivos.

Ainda dentro da função void `Setup()`, observa-se o uso do comando `Serial.begin(9600)`. Esta função é sempre inserida quando se decide trabalhar com a comunicação serial. Trata-se de uma medida de velocidade para comunicação e configuração do número de bits transmitidos por segundo (*baud rate*). Optou-se pelo valor de 9.600 bits por segundo, por ser comum entre os computadores.

Para atribuir a data e hora atuais ao módulo RTC, faz-se necessário o uso do comando `"myRTC.setDS1302Time(<segundos>, <minutos>, <hora>, <dia da semana>, <dia do mês>, <mês>, <ano>)"` na void `Setup ()`. Uma vez configuradas a data e a hora, a linha deve ser comentada (insere-se `//` antes do comando) e o programa novamente carregado no Arduino. O módulo RTC é alimentado por uma bateria de 3V que guarda essa informação, assim como o *clock* de um computador pessoal (PC) ou notebook.

As instruções `"digitalWrite(Porta2, HIGH)"`; `"digitalWrite(Porta3, HIGH)"`; e `"digitalWrite(Porta4, HIGH)"` visam a garantia de que todos os relés relacionados ao acionamento dos motores de movimentação do rolo de limpeza estejam desligados durante a iniciação do algoritmo. Essa medida de segurança lógica complementa o intertravamento dos motores já demonstrado anteriormente por meio dos diagramas elétricos. Assim, não é possível, por exemplo, que os movimentos de avanço e retorno do rolo de limpeza sejam iniciados ao mesmo tempo.

Destaca-se que o significado de "HIGH" difere-se dependendo se o pino é configurado como "*input*" ou "*output*". Quando um pino é configurado como saída (*output*) com o *pinMode* e o valor de *digitalWrite* é atribuído como "HIGH", o microcontrolador envia uma voltagem de 5V para este pino. Quando um pino é configurado como entrada (*input*) com o *pinMode* e leitura com o *digitalRead*, o microcontrolador irá reportar HIGH se uma tensão de 3V ou mais faz-se presente no pino. O significado de "LOW" também varia de acordo com a definição do pino como "*input*" ou "*output*". Quando um pino é configurado como uma entrada (*input*) com

pinMode e leitura com *digitalRead*, o microcontrolador irá reportar "LOW" se uma tensão de 2V ou menos estiver presente neste pino. Quando um pino é configurado como a saída (*output*) com *pinMode*, e definido como LOW com *digitalWrite*, a tensão neste pino é de 0 volts.

A função *mostrar_data()* é essencial para a questão temporal do sistema e está diretamente ligada ao módulo RTC DS1302. O comando *myRTC.updateTime()* lê as informações no módulo e repassa ao computador/tablet para que esse mostre-as na tela para o usuário no formato DD/MM/AAAA (dia, mês e ano; dados diretamente relacionados às variáveis *dayofmonth*, *month* e *year* da função *myRTC*) e HH:MM:SS (horas, minutos e segundos; respectivamente representados pelas variáveis *hours*, *minutes* e *seconds* da função *myRTC*). A data e hora são gravadas neste mesmo formato no arquivo .CSV.

A função *void limpeza()* recebe como parâmetro de entrada a variável "qtd", que está relacionada ao controle do número de repetições do procedimento de limpeza dos espelhos componentes do heliostato. Um ciclo completo corresponde aos movimentos de avanço do rolo de limpeza até o fim do heliostato e o retorno do rolo de limpeza até sua posição inicial. Ressalta-se que o usuário pode optar por acionar de um até cinco ciclos com apenas um comando. A estrutura "*while* (qtd > cont)" é o que delimita essas repetições. São mostradas a data, hora, o ciclo atual (podendo variar de 1 até 5), a quantidade de chuva detectada no início de cada ciclo, bem como o número de repetições programadas.

Ainda na função *void limpeza()*, o laço de repetição, identificado pela instrução "*while* (sensor2 != 1)", indica que os comandos inseridos dentro de sua estrutura serão executados continuamente até que o Sensor Indutivo 2 (delimitador da parte inferior do heliostato) seja acionado. Esses comandos estão relacionados ao acionamento da Porta 2 e 3 do Arduino, respectivamente responsáveis pelos movimentos de rotação e avanço do rolo de limpeza; e por manter a Porta 4 continuamente desligada, ou seja, garantindo que o movimento de retorno do rolo de limpeza à sua posição inicial nunca ocorra até a condição final do laço de repetição ser atingida.

Testa-se o acionamento ou não do Sensor Indutivo 2 a cada 0,1 segundo. Quando finalmente este Sensor é acionado, observa-se a execução dos seguintes

comandos: `digitalWrite(Porta2, HIGH); digitalWrite(Porta3, HIGH); digitalWrite(Porta4, HIGH);` e `delay(3000)`. Isso significa que todos os relés são desativados e ambos os motores são desligados por três segundos, visando não forçá-los com mudanças bruscas de rotação, garantindo assim uma maior vida útil dos mesmos.

Após a pausa de três segundos, o segundo laço de repetição, identificado por "`while (sensor1 != 1)`" é iniciado. Os comandos ali inseridos serão executados repetidamente até que o Sensor Indutivo 1 (delimitador da parte superior do heliostato; indicação da posição inicial do rolo de limpeza) seja acionado. Esses comandos estão relacionados ao acionamento da Porta 2 e 4 do Arduino, respectivamente responsáveis pelos movimentos de rotação e retorno do rolo de limpeza até sua posição inicial; e por manter a Porta 3 sempre desativada, ou seja, assegurando que o movimento de avanço do rolo de limpeza nunca ocorra simultaneamente ao de retorno, até que a condição final do laço de repetição seja alcançada.

Avalia-se o acionamento do Sensor Indutivo 1 a cada 0,1 segundo. Quando este sensor é acionado, todos os relés são desativados e ambos os motores são desligados, finalizando aquele ciclo de limpeza específico. Ressalta-se que o é possível repeti-lo de uma até cinco vezes.

A função void `Loop()` faz o que seu nome sugere: laços de repetições das operações que se encontram em seu interior. Nesta função, considerando este projeto específico, basicamente são controlados o funcionamento do sensor de chuva: seu acionamento e provimento sobre o momento da ocorrência de chuva (data e hora), bem como o nível de líquido registrado no sensor e o estabelecimento dos comandos que podem ser inseridos pelo usuário.

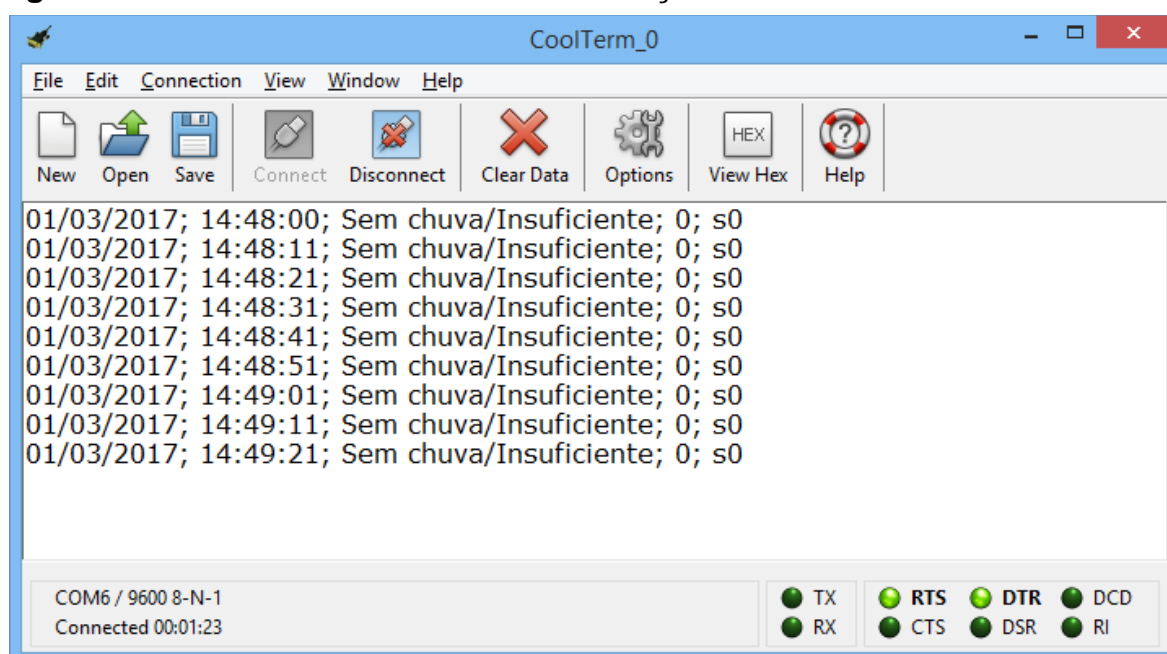
Considerando que o sensor de chuva foi configurado inicialmente como entrada por meio da instrução "`pinMode(sensorChuva, INPUT)`", repetidamente é realizada a leitura desse sensor e o valor é enviado à porta analógica A0, através do comando "`qtd_chuva= analogRead(sensorChuva)`".

Enquanto o nível de chuva detectado for zero (sem chuva) ou inferior a 200 (chuva fraca), a mensagem "Sem chuva/Insuficiente" é mostrada na tela para o

usuário, acompanhada da data e hora atuais, bem como o nível de chuva e se há ou não limpezas previamente programadas. Isso é feito por meio das instruções contidas dentro da estrutura de decisão indicada por "if (qtd_chuva > 0 && qtd_chuva < 200)".

A Figura 47 apresenta as mensagens mostradas no programa CoolTerm, considerando a situação exposta no parágrafo anterior. Neste caso, a leitura do sensor de chuva ocorre em intervalos de 10 segundos.

Figura 47 - Leituras do sensor com informações sobre a inexistência de chuva



Fonte: Elaborada pelo autor.

Mesmo com o sensor não detectando chuva ou caso a chuva seja demasiadamente fraca para acionar o mecanismo de limpeza de espelhos de heliostatos, o usuário pode enviar comandos ao sistema para que o mesmo seja acionado na próxima vez que chover em quantidade suficiente. Os comandos possíveis são mostrados na Tabela 9, a seguir:

Tabela 9 - Comandos de interação entre usuário e mecanismo de limpeza de heliostatos.

Comando	Resposta
S1 ou s1	Efetua um ciclo de limpeza nos espelhos do heliostato naquele instante ou programa um ciclo para a próxima ocasião com chuva suficiente.
S2 ou s2	Efetua dois ciclos de limpeza nos espelhos do heliostato naquele instante ou programa dois ciclos para a próxima ocasião com chuva suficiente.
S3 ou s3	Efetua três ciclos de limpeza nos espelhos do heliostato naquele instante ou programa três ciclos para a próxima ocasião com chuva suficiente.
S4 ou s4	Efetua quatro ciclos de limpeza nos espelhos do heliostato naquele instante ou programa quatro ciclos para a próxima ocasião com chuva suficiente.
S5 ou s5	Efetua cinco ciclos de limpeza nos espelhos do heliostato naquele instante ou programa cinco ciclos para a próxima ocasião com chuva suficiente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

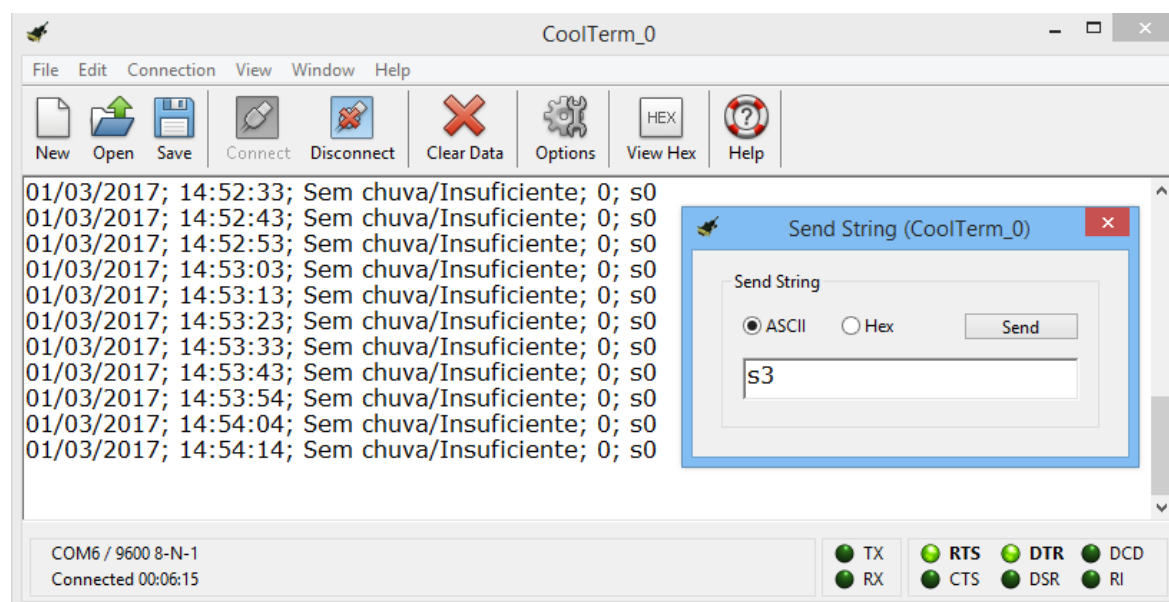
Dentro do algoritmo, a definição dos comandos de entrada por parte do usuário evidenciam-se por meio da estrutura de decisão "(acionamento == "s1" || acionamento == "S1" || acionamento == "s2" || acionamento == "S2" || acionamento == "s3" || acionamento == "S3" || acionamento == "s4" || acionamento == "S4" || acionamento == "s5" || acionamento == "S5")". Nota-se que houve o devido cuidado no tratamento do caractere "S", sendo possível utilizá-lo em formato minúsculo ou maiúsculo, em conjunto com o número de repetições escolhido.

Como o Arduino trabalha recebendo bytes de acordo com a tabela ASCII (*American Standard Code for Information Interchange* ou Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação), um esquema de codificação que atribui valores numéricos a caracteres visando padronizar a troca de dados entre computadores, foi necessário, no código, converter o decimal corresponde ao algarismo que representa as repetições em questão. É possível observar essa conversão através das instruções contidas dentro da estrutura de decisão "switch (qtdchar)". Assim, o código decimal 49 refere-se ao caractere 1; o código decimal 50 representa o caractere 2; e assim sucessivamente.

Quando não há limpezas programadas ou quando o mecanismo não se encontra em movimento, o valor "s0" é mostrado ao usuário. Para que isso ocorra, fez-se uso das seguintes linhas de código: "if (acionamento == "") { Serial.print("s0"); }".

Observa-se, por meio da Figura 48, que mesmo sem a ocorrência de chuva, o usuário está enviando o instrução "s3" ao mecanismo de limpeza. Isso significa que, na próxima vez que ocorrer chuva com intensidade acima de 200, o sistema será acionado para que realize três repetições dos movimentos de avanço e retorno do rolo rotacionado de limpeza (três ciclo completos).

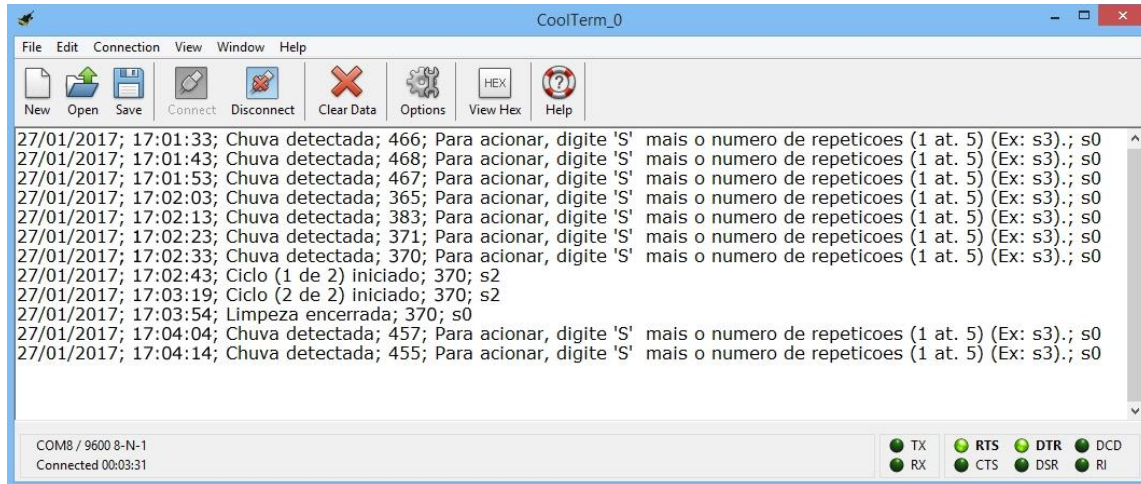
Figura 48 - Acionamento do mecanismo programado pelo usuário



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando há ocorrência de chuva suficiente para efetuar a limpeza, ou seja, quando o valor da variável qtd_chuva é maior que 200, o sistema apresenta ao usuário as seguintes informações: data; hora; a mensagem "Chuva detectada"; o valor do nível de chuva enviado pelo sensor ao Arduino e uma mensagem questionando-o sobre o acionamento do mecanismo, conforme mostrado na Figura 49.

Figura 49 - Detecção de nível de chuva aceitável para acionamento do mecanismo



Fonte: Elaborada pelo autor.

A instrução `"while (Serial.available() > 0)"` verifica se existem dados disponíveis para leitura (dígitos inseridos pelo usuário). Essa função auxilia em laços de repetições onde a leitura dos dados só é realizada quando há dados disponíveis. Caso contrário, permanece imutável. Por sua vez, `"caractere = Serial.read()"` refere-se à leitura do byte mais recente no buffer da porta serial.

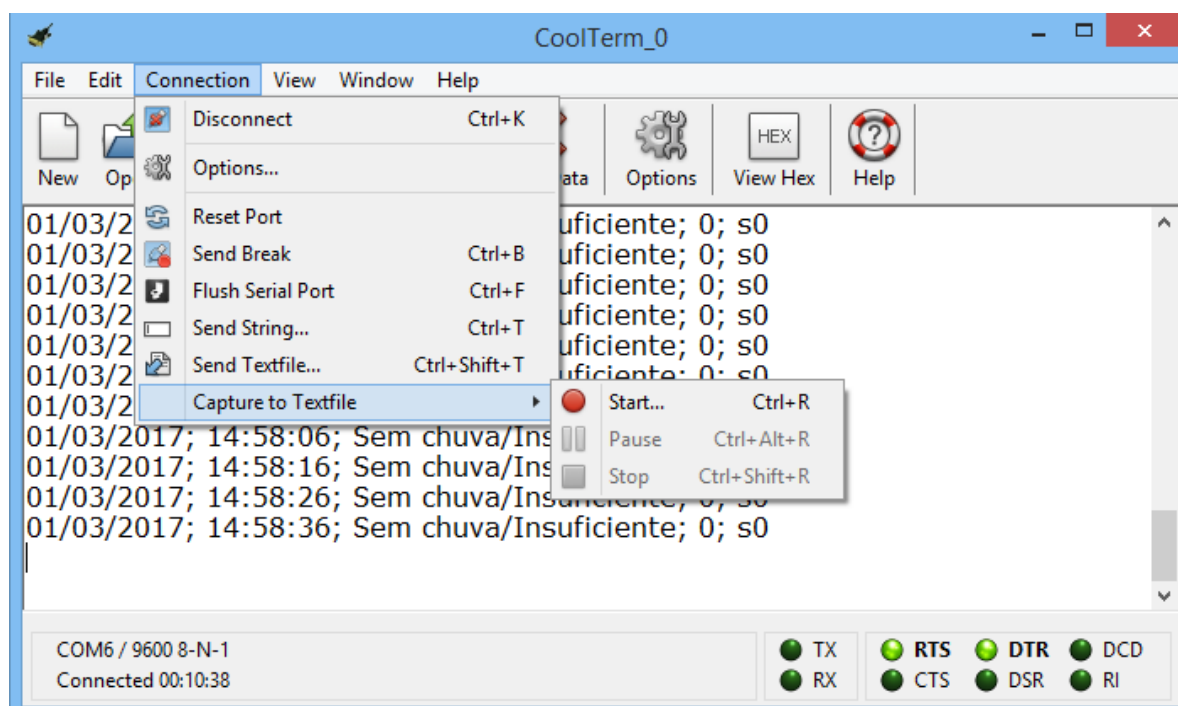
Caso haja pré-programação de atuação do mecanismo, esse será acionado automaticamente. Em caso negativo, o mesmo só será acionado por meio dos comandos mostrados na Tabela 9, anteriormente, e desde que ainda haja chuva suficiente.

Ainda na Figura 49, evidencia-se a seguinte situação: às 17h01m33s foi detectado um nível aceitável de chuva para limpar os espelhos do heliostato. O acionamento ocorreu por meio de comando `"s2"` enviado pelo usuário às 17h02m43s, ou seja, ativando o mecanismo para que este realizasse dois ciclos completos de limpeza. Observa-se que cada um deles levou cerca de 35 segundos para ser completado e a limpeza foi encerrada às 17h03m54s.

Quando todos os ciclos de limpeza são cumpridos, observa-se que os dados ainda armazenados na comunicação serial são apagados por meio da instrução `"Serial.flush()"` e que as variáveis `"acionamento"`, `"qtd"` e `"cont"` voltam aos seus valores originais, ou seja, nulo ou zero.

As informações mostradas pelo programa CoolTerm são guardadas num arquivo .CSV que serve como repositório de dados históricos sobre as limpezas já realizadas no heliostato. O histórico de limpeza pode ser acessado a qualquer momento consultas e provê um maior controle sobre eventuais acionamentos posteriores. A escolha deste formato de arquivo se deu pela facilidade de abertura do mesmo em programas simples, como Bloco de Notas ou Microsoft Excel. Para que essa gravação ocorra, é necessário que, por uma única vez quando o programa é aberto, o usuário ative-a por meio dos menus Connection >> Capture File >> Start, conforme mostrado na Figura 50, ou simplesmente pelo atalho CTRL + R.

Figura 50 - Ativação da gravação de dados em arquivo .CSV



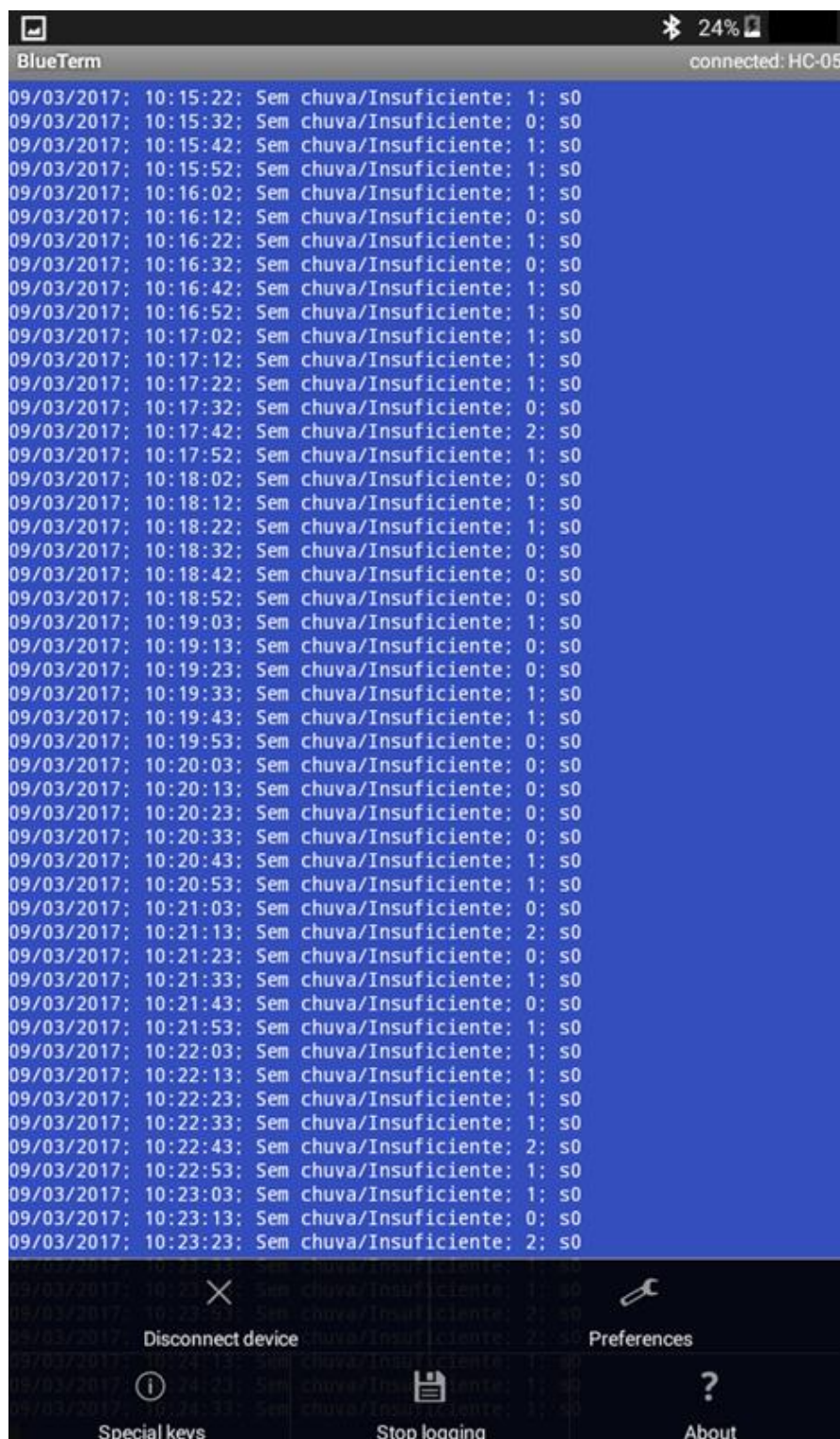
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para utilizar do sistema por meio de dispositivos móveis, dois aplicativos foram testados: BlueTerm e Bluetooth spp Pro. Apesar de ambos atingirem a finalidade às quais foram desenvolvidos, optou-se pelo primeiro citado (BlueTerm) pelo fato das informações mostradas em tela para o usuário estarem dispostas de maneira mais adequada e também pelo fato de serem gravadas exatamente da mesma forma no arquivo .CSV gerado pela aplicação. Outros fatores que influenciaram na escolha do

BlueTerm foram: a capacidade da aplicação permitir ao usuário operá-la e controlá-la facilmente; e os requintes visuais utilizados na sua interface gráfica.

A Figura 51 apresenta a forma como as informações lidas pelos sensores de chuva e RTC são mostradas ao usuário no aplicativo BlueTerm. Neste caso, entende-se que não há chuva detectada no dia 09/03/2017 entre os horários da 10h15m22s até 10h23m23s. Ao mesmo tempo, não há nenhuma operação de limpeza programada, pois o status da última coluna aponta o valor "s0". Na mesma imagem, observa-se como os menus de acesso às operacionalidades da aplicação mostram claramente suas funções, fazendo com que o usuário entenda a interface de maneira praticamente intuitiva.

Figura 51 - Funcionamento do sistema por meio do aplicativo BlueTerm



Fonte: Elaborada pelo autor.

A opção representada por um xis (X) realiza a desconexão ou conexão do aplicativo com o dispositivo *Bluetooth* ao qual ele esteja ligado ou que se deseja ligar. Ao seu lado, existe a opção "*Preferences*", onde pode-se configurar, por

exemplo, a orientação da tela (formatos vertical ou horizontal / retrato ou paisagem); emissão de sinal sonoro ou não ao apertar as teclas; tamanho e cor da fonte; cor do fundo da tela; entre outras opções que adaptam a aplicação de acordo com as preferências do usuário.

Caso o usuário necessite enviar pelo aplicativo uma tecla especial, como TAB, espaço em branco ou CTRL, isso pode ser feito pela opção "*Special Keys*", no menu.

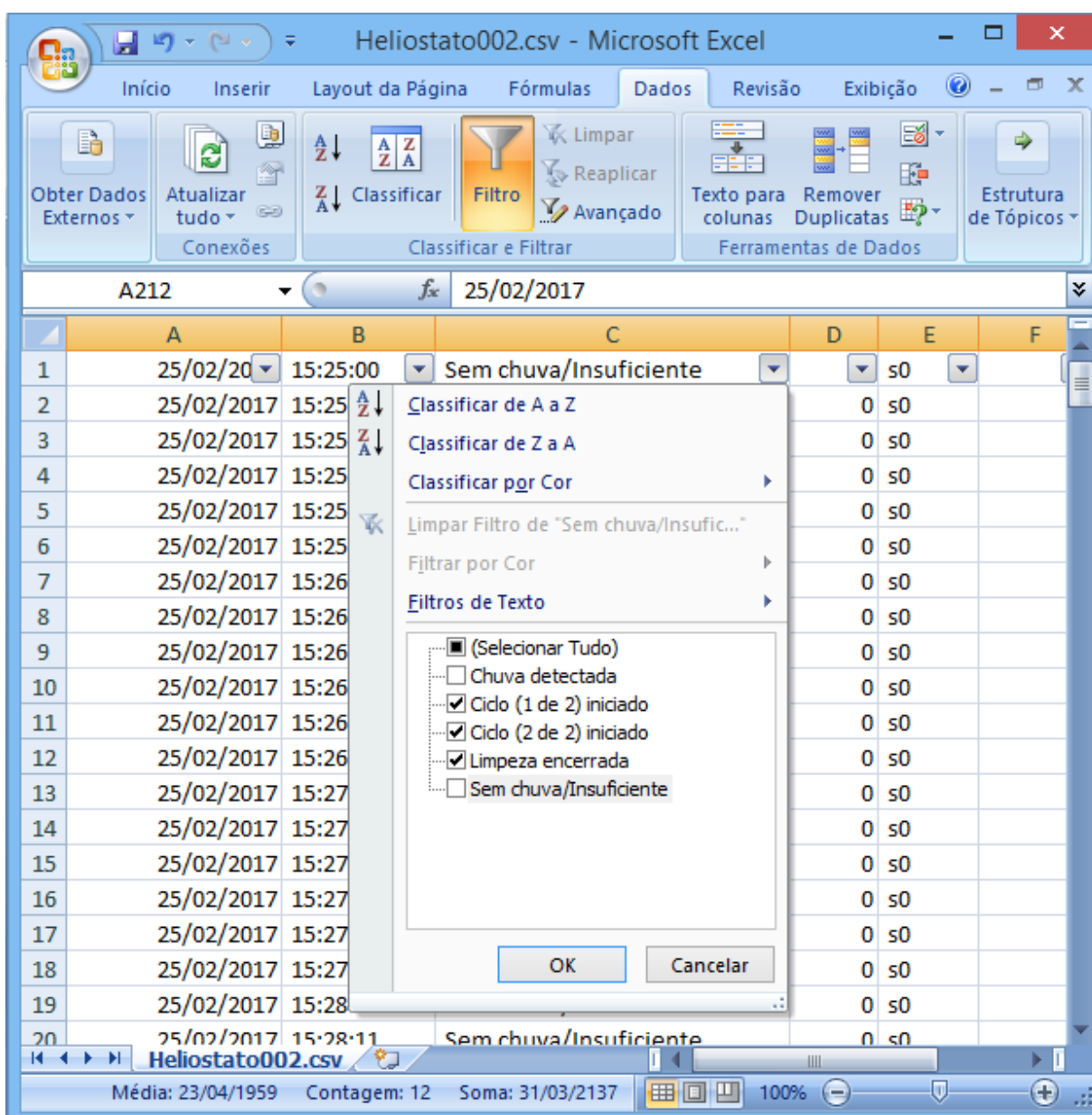
Por meio do menu indicado por um disquete, é possível iniciar ou finalizar a gravação dos dados mostrados em tela para um arquivo de texto, ou seja, essa função é similar àquela do software CoolTerm, apresentada anteriormente na Figura 50.

Os arquivos de texto contendo todas as leituras realizadas pelos sensores componentes do dispositivo e as ações dos atuadores podem ser gerados por qualquer uma das aplicações citadas neste estudo: CoolTerm; BlueTerm ou Bluetooth spp Pro. Eles podem ser facilmente convertidos para a extensão .CSV e trabalhados em softwares de planilhas de cálculo, como o Microsoft Excel ou OpenOffice Calc/LibreOffice Calc. No caso deste estudo, conforme já mencionado no item 5.1 (Materiais), a escolha do Microsoft Excel se deu devido à facilidade de manuseio e pelo fato de ser um programa disponível em praticamente todos os computadores, atualmente.

Nota-se, na Figura 52, que os dados ficam distribuídos de forma organizada em cada uma das colunas, sendo:

- a) Coluna A: data da realização da leitura pelo sensor de chuva;
- b) Coluna B: hora da realização da leitura pelo sensor de chuva;
- c) Coluna C: mensagens apresentadas para o usuário;
- d) Coluna D: quantidade de chuva informada pelo sensor;
- e) Coluna E: código das operações do mecanismo (S0 até S5), tendo seus significados já explicados anteriormente neste mesmo item;
- f) Coluna F: outras mensagens informadas ao usuário pelo sistema.

Figura 52 - Exemplo de conteúdo de arquivo .CSV no Microsoft Excel



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o objetivo de mostrar apenas um subconjunto de informações específicas e ocultar as demais, o Microsoft Excel possibilita a aplicação de filtros no dados de uma planilha. Assim, ainda na Figura 52, observa-se que, por meio do menu "Dados" e a escolha da opção "Filtros", pode-se facilmente ocultar as mensagens "Chuva detectada" e "Sem chuva/Insuficiente", resultando numa filtragem dos dados (linhas da planilha) que só apresentem as linhas relacionadas às mensagens marcadas. Neste caso, serão mostrados apenas os dados relacionados ao início de cada ciclo de limpeza - "Ciclo (1 de 2) iniciado" e "Ciclo (2 de 2) iniciado" - e o fim das

operações como um todo - "Limpeza encerrada". Conseqüentemente, é possível visualizar apenas as operações de limpeza do heliostato realizadas no dia 25/02/2017, ocultando todo o restante do conteúdo do arquivo como, por exemplo, situações sem ocorrência de chuva ou sem o acionamento do mecanismo.

O resultado da aplicação do filtro é mostrado na Figura 53.

Figura 53 - Exemplo de resultados após a aplicação de filtro no arquivo .CSV

	A	B	C	D	E	F
1	25/02/20	15:25:00	Sem chuva/Insuficiente	s0		
204	25/02/2017	01:37:21	Ciclo (1 de 2) iniciado	418	s2	
205	25/02/2017	01:37:57	Ciclo (2 de 2) iniciado	418	s2	
206	25/02/2017	01:38:32	Limpeza encerrada	418	s0	
260						
261						
262						
263						

Fonte: Elaborada pelo autor.

Baseando-se nos dados dos arquivos, além de se acompanhar todo o histórico de operações de limpeza realizadas num heliostato específico, o usuário pode tomar decisões de programar ou não uma limpeza automática para a próxima ocasião que chover em quantidade suficiente.

Salienta-se que, após filtrar dados em um intervalo de células ou mesmo na planilha toda, é possível reaplicar um filtro para obter resultados atualizados ou limpar um filtro para exibir todos os dados novamente.

1.4.4 Avaliação do funcionamento do dispositivo por meio de situações reais

Considerando que o terceiro objetivo específico estabelecido nesta pesquisa refere-se à avaliação do funcionamento do dispositivo para limpeza construído por meio de situações reais de aplicação, optou-se por descrever as ações e testes realizados com o mesmo neste item.

A aplicação do dispositivo automático para limpeza de superfícies espelhadas componentes de heliostatos em situações reais foi iniciada em 25/01/2017, considerando que um dia antes disso foi finalizada a montagem do mecanismo, incluindo suas estruturas mecânica, elétrica e eletrônica.

Antes disso, em novembro de 2016, foram registradas fotografias com o objetivo de constatar a situação da sujidade do heliostato utilizado como objeto de estudo. Assim, na Figura 54, é possível observar, em ambos os itens A e B, a presença de algumas manchas causadas pelo acúmulo de excrementos de pássaros e outras por razão da sedimentação de detritos nos espelhos, especialmente de terra/poeira, por razão do artefato encontrar-se no interior de uma propriedade rural. Além disso, destaca-se que, em nenhum momento desde a finalização da montagem do heliostato no Departamento de Engenharia Rural da FCA/Unesp/Botucatu, em setembro de 2015, houve qualquer operação direcionada exclusivamente para a limpeza dos espelhos que o compõe. Qualquer tipo de minimização da sujidade ocorreu devido à ação de condições de tempo, como vento ou chuva forte, sem qualquer influência da ação do homem.

**Figura 54 - Presença de manchas nas superfícies espelhadas
(novembro/2016)**



A Figura 55 apresenta dois ângulos de visão (A e B) do mesmo ponto, sendo este relacionado ao quarto espelho que compõe o heliostato, considerando uma contagem do topo até sua extremidade inferior, e o acúmulo de poeira no mesmo. Para uma melhor visualização deste fato, optou-se por realizar uma limpeza com pano e água em apenas uma pequena parte de sua superfície, esfregando levemente. Esta encontra-se destacada em vermelho na imagem. Assim, torna-se evidente o contraste entre a parte do espelho que foi limpa e a parte a qual não foi afetada.

**Figura 55 - Sujidade no quarto espelho componente do heliostato
(novembro/2016)**



Com a intenção de destacar o impacto do acúmulo de poeira na sexta tira de espelho que forma o heliostato em questão, novamente fez-se uso de um pano e água, apenas, para suceder-se uma leve limpeza em uma parte deste espelho. Por meio do reflexo do telhado do Departamento de Engenharia Rural (FCA/Unesp/Botucatu) visto na Figura 56, é perceptível que o restante dos espelhos encontra-se em situação praticamente opaca em relação à área que foi limpa, destacada em vermelho.

**Figura 56 - Sujidade no sexto espelho componente do heliostato
(novembro/2016)**



Finalmente, em relação aos registros fotográficos efetuados em novembro/2016, nota-se, por meio da Figura 57, a contraposição entre a refletividade das áreas limpas com pano e água (sem o uso de qualquer tipo de produto de limpeza) citadas anteriormente, destacadas em vermelho, e o restante das superfícies espelhadas do heliostato.

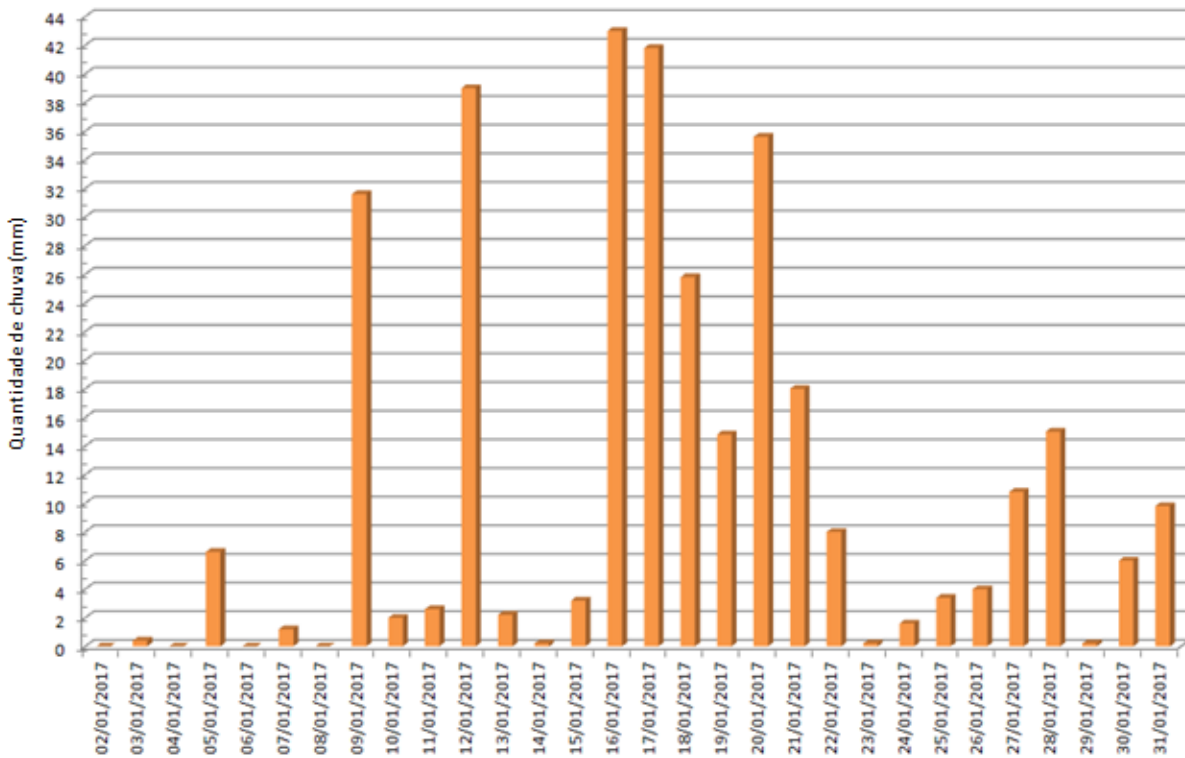
Figura 57 - Sujidade das áreas limpas em relação aos demais espelhos do heliostato (novembro/2016)



Como citado no início deste subitem, os testes com o dispositivo de limpeza tiveram início em 25/01/2017.

Conforme dados obtidos por meio da estação meteorológica localizada no Departamento de Engenharia Rural (FCA/Unesp/Botucatu), no mês de janeiro, o índice pluviométrico total foi de 327 mm, sendo a quantidade de chuva diária distribuída conforme mostra o gráfico apresentado na Figura 58.

Figura 58 - Índices pluviométricos diários referentes ao mês de janeiro de 2017



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, no mês de janeiro, ocorreram 17 ciclos de limpeza, sendo em sua maioria ciclos acionados manualmente. Ressalta-se que um ciclo refere-se ao movimento completo do dispositivo, ou seja, de avanço e retorno da escova de limpeza. O detalhamento sobre esses acionamentos são mostrados na Tabela 10, a seguir. Apenas dois procedimentos ocorreram de forma automática: o de três repetições (S3) iniciado após às 10h05 da manhã do dia 25/01/2017 e o ciclo S1 ocorrido às 17h30 do dia 30/01/2017. Em todos os casos, o funcionamento do dispositivo mostrou-se adequado, não apresentando falhas no sistema de controle, bem como não ocorreram panes elétricas, eletrônicas ou mecânicas.

Tabela 10 - Comparação entre os dados pluviométricos da estação meteorológica e ciclos de limpeza (jan/2017)

Data	Quantidade de chuva (mm)	Ciclos de limpeza	Tipos de ciclo	Horários
24/01/2017	1,6	0	-	
25/01/2017	3,4	7	S2; S2; S3	8h03; 8h22; 10h05
26/01/2017	4	0	-	
27/01/2017	10,8	9	S3; S4; S2	10h24; 10h40; 17h02
28/01/2017	15	0	-	
29/01/2017	0,2	0	-	
30/01/2017	6	1	S1	17h03
31/01/2017	9,8	0	-	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por uma questão de comparação dos horários nos quais ocorreram operações de limpeza, bem como a data e a hora de início de cada ciclo e quantidade de chuva que influenciou o acionamento do sistema, foi realizado um confronto dos conteúdos dos arquivos *logs* (arquivos de texto .CSV contendo as informações sobre o funcionamento do mecanismo de limpeza, mencionados anteriormente neste estudo) e dos dados pluviométricos obtidos por meio da estação meteorológica. Por uma questão de organização, essas informações foram compiladas em tabelas separadas pelos respectivos dias em que o mecanismo foi acionado, sendo Tabela 11 referente ao dia 25/01/2017; Tabela 12 correspondente ao dia 27/01/2017; e, finalmente, Tabela 13 apresentando os dados do dia 30/01/2017.

Através da Tabela 11, evidenciam-se três situações de acionamento do mecanismo, sendo a primeira iniciada às 08h03m23s e composta por dois ciclos completos de limpeza. A segunda ativação do mecanismo se deu às 08h22h13s e também optou-se pela realização de dois ciclos de limpeza. Por fim, um comando “s3” foi enviado às 10h05m12s.

Tabela 11 - Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 25/01/2017

Data - 25/01/2017 - Quantidade total de chuva: 3,4 mm		
Registros da estação meteorológica		Registros do arquivo .CSV
Horário	Quantidade de chuva (mm)	
8h10	0,2	08:03:23; Ciclo (1 de 2) iniciado; 390; s2
8h20	0,2	08:03:58; Ciclo (2 de 2) iniciado; 390; s2
8h30	1,4	08:04:33; Limpeza encerrada; 390; s0
8h40	1,2	08:22:13; Ciclo (1 de 2) iniciado; 470; s2
8h50	0,2	08:22:48; Ciclo (2 de 2) iniciado; 470; s2
10h10	0,2	08:23:23; Limpeza encerrada; 470; s0
		10:05:12; Ciclo (1 de 3) iniciado; 322; s3
		10:05:47; Ciclo (2 de 3) iniciado; 322; s3
		10:06:22; Ciclo (3 de 3) iniciado; 322; s3
		10:06:57; Limpeza encerrada; 322; s0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se, por meio da Tabela 12, que no dia 27/01/2017 o volume acumulado de chuva foi o equivalente a 10,8 mm e que nesta data foram executados comandos s3, s4 e s2, respectivamente às 10h24m02s; 10h40m13s e 17h02m43s.

Tabela 12 - Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 27/01/2017.

Data - 27/01/2017 - Quantidade total de chuva: 10,8 mm		
Registros da estação meteorológica		Registros do arquivo .CSV
Horário	Quantidade de chuva (mm)	
6h10	0,2	10:24:02; Ciclo (1 de 3) iniciado; 412; s3
7h30	0,2	10:24:37; Ciclo (2 de 3) iniciado; 412; s3
7h50	0,4	10:25:12; Ciclo (3 de 3) iniciado; 412; s3
8h00	0,4	10:25:47; Limpeza encerrada; 412; s0
8h10	0,4	10:40:13; Ciclo (1 de 4) iniciado; 518; s4
8h20	0,4	10:40:48; Ciclo (2 de 4) iniciado; 518; s4
8h30	0,2	10:41:23; Ciclo (3 de 4) iniciado; 518; s4
9h10	0,2	10:41:58; Ciclo (4 de 4) iniciado; 518; s4
9h30	0,2	10:41:34; Limpeza encerrada; 518; s0
9h50	0,2	17:02:43; Ciclo (1 de 2) iniciado; 370; s2
10h30	1	17:03:19; Ciclo (2 de 2) iniciado; 370; s2
10h40	1,2	17:03:54; Limpeza encerrada; 370; s0
10h50	0,4	
16h00	0,2	
16h10	0,4	

16h20	0,6	
16h30	0,4	
16h40	0,6	
16h50	0,6	
17h00	0,2	
17h10	0,6	
17h20	0,2	
17h30	0,2	
17h40	0,2	
17h50	0,2	
18h00	0,2	
18h20	0,2	
18h40	0,2	
19h00	0,2	
19h10	0,2	

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 13, refere-se à operação de limpeza composto por ciclo simples (s1) realizada no dia 30/01/2017, quando o volume acumulado de chuva foi 6,0 mm. Neste caso, o acionamento do mecanismo se deu às 17h03m13s e todo o processo levou 36 segundos.

Tabela 13 - Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 30/01/2017.

Data - 30/01/2017 - Quantidade total de chuva: 6,0 mm		
Registros da estação meteorológica		Registros do arquivo .CSV
Horário	Quantidade de chuva (mm)	
17h00	2,8	17:03:14; Ciclo (1 de 1) iniciado; 509; s1
17h10	3	17:03:50; Limpeza encerrada; 509; s0
19h30	0,2	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação à eficiência da operação de limpeza, foi observado que, após o primeiro dia de operações, ou seja, 25/01/2017, a mesma foi maior nas áreas laterais dos espelhos, sendo identificado um leve acúmulo de sujeira na região central dos mesmos, conforme pode ser observado na Figura 59, em diferentes ângulos de visão (A e B).

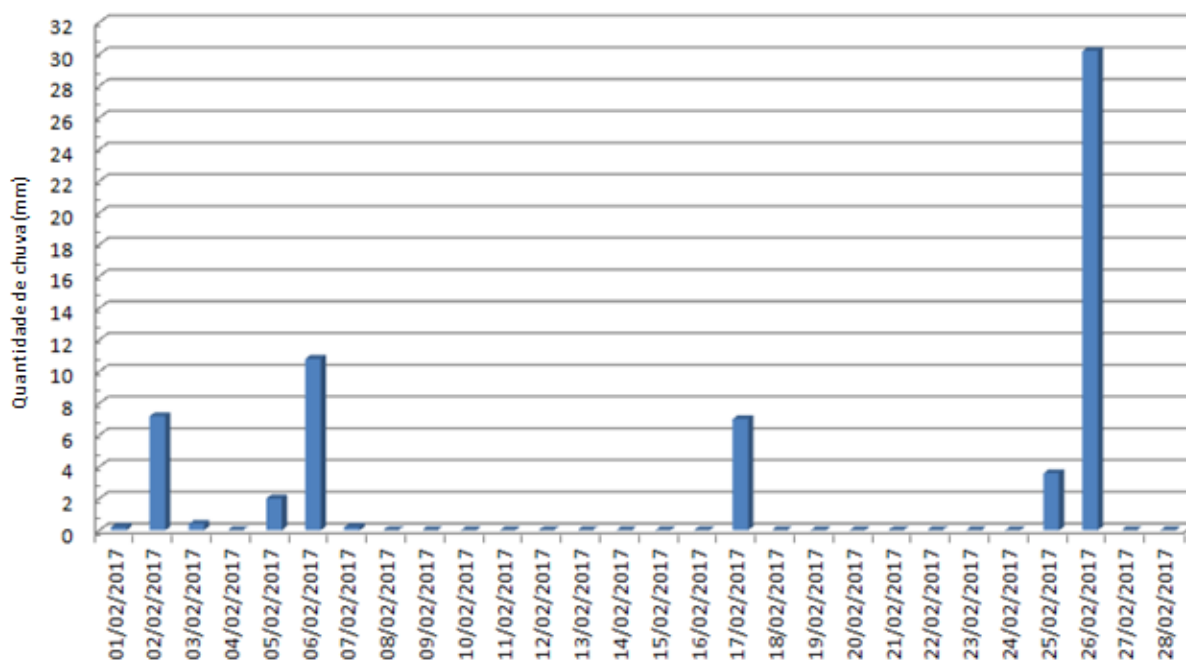
Figura 59 - Situação dos espelhos após ciclos de limpeza realizados em 25/01/2017



Essa questão, porém, foi logo solucionada com o ajuste da altura das cerdas em relação às superfícies espelhadas por meio de um decréscimo de 2 mm em relação ao furo bilongo, efetuado após os primeiros nove ciclos de limpeza. A partir deste ponto, as operações mostraram-se mais uniformes e, após a ação do dia 30/01/2017, todas as seis superfícies espelhadas demonstravam considerável melhora em sua refletividade em relação ao estágio inicial dos testes.

Em fevereiro, registrou-se um índice pluviométrico total de 61,6 mm na estação meteorológica de Departamento de Engenharia Rural (FCA/Unesp/Botucatu). Este valor encontra-se abaixo das médias históricas para o mês, tanto considerando apenas os últimos onze anos (185,40 mm); quanto do ano de 1971 até 2016 (201,46 mm). As quantidades diárias de chuva são apresentadas na Figura 60, a seguir.

Figura 60 - Índices pluviométricos diários referentes ao mês de fevereiro de 2017



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram executados, durante o mês de fevereiro/2017, onze ciclos de limpeza, sendo nove iniciados manualmente e dois em modo automático. Especificamente, os que ocorreram de maneira automática foram os registrados às 18h03 do dia 02/02/2017 e às 1h37 do dia 25/02/2017. Novamente, não foram constatadas inadequações no funcionamento do dispositivo.

A Tabela 14, a seguir, apresenta uma compilação dos dados sobre os índices pluviométricos registrados pela estação meteorológica e um detalhamento das operações realizadas durante o mês de fevereiro de 2017 pelo mecanismo de limpeza. É possível constatar que, no referido mês, registrou-se ocorrência de chuvas em apenas nove dias e que a somatória mensal foi de 61,6 mm, conforme já citado. As atividades de limpeza foram realizadas em três destes dias: 02/02/2017; 17/02/2017; e 25/02/2017.

Tabela 14 - Comparação entre os dados pluviométricos da estação meteorológica e ciclos de limpeza (fev/2017)

Data	Quantidade de chuva (mm)	Ciclos de limpeza	Tipos de ciclo	Horários
01/02/2017	0,2	0	-	
02/02/2017	7,2	4	S3; S1	14h29; 18h03
03/02/2017	0.4	0	-	
04/02/2017	Manutenção da estação meteorológica			
05/02/2017	2	0	-	
06/02/2017	10,8	0	-	
07/02/2017	0,2	0	-	
08/02/2017	0	0	-	
09/02/2017	0	0	-	
10/02/2017	0	0	-	
11/02/2017	0	0	-	
12/02/2017	0	0	-	
13/02/2017	0	0	-	
14/02/2017	0	0	-	
15/02/2017	0	0	-	
16/02/2017	0	0	-	
17/02/2017	7	5	S5	15h59
18/02/2017	0	0	-	
19/02/2017	0	0	-	
20/02/2017	0	0	-	
21/02/2017	0	0	-	
22/02/2017	0	0	-	
23/02/2017	0	0	-	
24/02/2017	0	0	-	
25/02/2017	3,6	2	S2	1h37
26/02/2017	30,2	0	-	
27/02/2017	0	0	-	
28/02/2017	0	0	-	

Fonte; Elaborada pelo autor.

Novamente, buscou-se comparar os dados contidos no arquivo .CSV gerado pelo mecanismo de limpeza e os dados pluviométricos provenientes da estação

meteorológica, desta vez detalhando somente os dias nos quais ocorrem ciclos de limpeza. Assim, a Tabela 15 refere-se ao dia 02/02/2017; Tabela 16 corresponde aos dados do dia 17/02/2017; e, finalmente, a Tabela 17 apresenta os dados do dia 25/02/2017.

Tabela 15 - Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 02/02/2017

Registros da estação meteorológica		Registros do arquivo .CSV
Horário	Quantidade de chuva (mm)	
14h30	1	14:29:04; Ciclo (1 de 3) iniciado; 483; s3
14h40	3	14:29:40; Ciclo (2 de 3) iniciado; 483; s3
18h10	0,2	14:30:16; Ciclo (3 de 3) iniciado; 483; s3
18h30	0,2	14:30:51; Limpeza encerrada; 483; s0
19h10	0,4	18:03:24; Ciclo (1 de 1) iniciado; 333; s3
19h30	0,4	18:04:01; Limpeza encerrada; 333; s0
19h40	0,2	
20h00	0,2	
20h50	0,2	
22h30	0,2	
22h40	0,2	
23h00	0,2	
23h30	0,4	
23h40	0,4	

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 61, a seguir, apresenta a questão da sujidade nos espelhos do heliostato usado como objeto de estudo e foram registradas no dia 06/02/2017, ou seja, quatro dias após os ciclos de limpeza citados na Tabela 15. Nota-se, assim, a efetividade do mecanismo proposto. Os pequenos montantes de água acumulados sobre as superfícies espelhadas são justificados pela ocorrência de chuva neste dia.

Figura 61 - Situação da sujidade nos espelhos registrada em 06/02/2017

Ainda na Tabela 14, apresentada anteriormente, nota-se a ocorrência de apenas 0,2 mm de chuva no dia 07/02/2017 e, partir deste ponto, a inexistência de situações de chuva até o dia 17/02/2017. Dentro deste período, ocorreram manutenções prediais no Departamento de Engenharia Rural, onde está situado o heliostato, incluindo corte da grama nas proximidades do equipamento. Assim, observa-se na Figura 62 que isto influenciou o aumento da sujidade nas superfícies espelhadas do heliostato, fazendo com que este ficasse em situação similar àquela apresentada em novembro de 2016. Ressalta-se que as imagens A, B e C que formam a figura supracitada foram registradas no dia 16/02/2017.

Figura 62 - Situação da sujidade nos espelhos registrada em 16/02/2017



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base na situação que se encontrava o heliostato em relação à sujidade, acionou-se, no dia 17/02/2017, um comando "s5", ou seja, cinco ciclos seguidos de limpeza dos espelhos. Conforme mostra a Tabela 16, esse operação teve início às 15h59m31s num momento onde o volume de chuva era consideravelmente alto; e foi finalizada às 16h02m30s.

Tabela 16 - Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 17/02/2017

Registros da estação meteorológica		Registros do arquivo .CSV
Horário	Quantidade de chuva (mm)	
16h00	3,8	15:59:31; Ciclo (1 de 5) iniciado; 581; s5
16h10	1,4	16:00:07; Ciclo (2 de 5) iniciado; 581; s5
16h20	0,6	16:00:43; Ciclo (3 de 5) iniciado; 581; s5
16h30	1,2	16:01:19; Ciclo (4 de 5) iniciado; 581; s5
		16:01:55; Ciclo (5 de 5) iniciado; 581; s5
		16:02:30; Limpeza encerrada; 581; s0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Evidenciou-se considerável melhora na refletividade dos espelhos componentes do heliostato após as operações de limpeza realizadas no dia 17/02/2017. A Figura 63, a seguir, mostra a situação do heliostato em 23/02/2017.

Figura 63 - Situação da sujidade nos espelhos registrada em 23/02/2017



Foto: Marcelo Lampkowski - 2017

Após mais um período sem chuvas (de 18/02 até 24/02), uma operação de limpeza composta por dois ciclos foi efetuada na madrugada do dia 25/02/2017, conforme consta na Tabela 17.

Tabela 17 - Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 25/02/2017

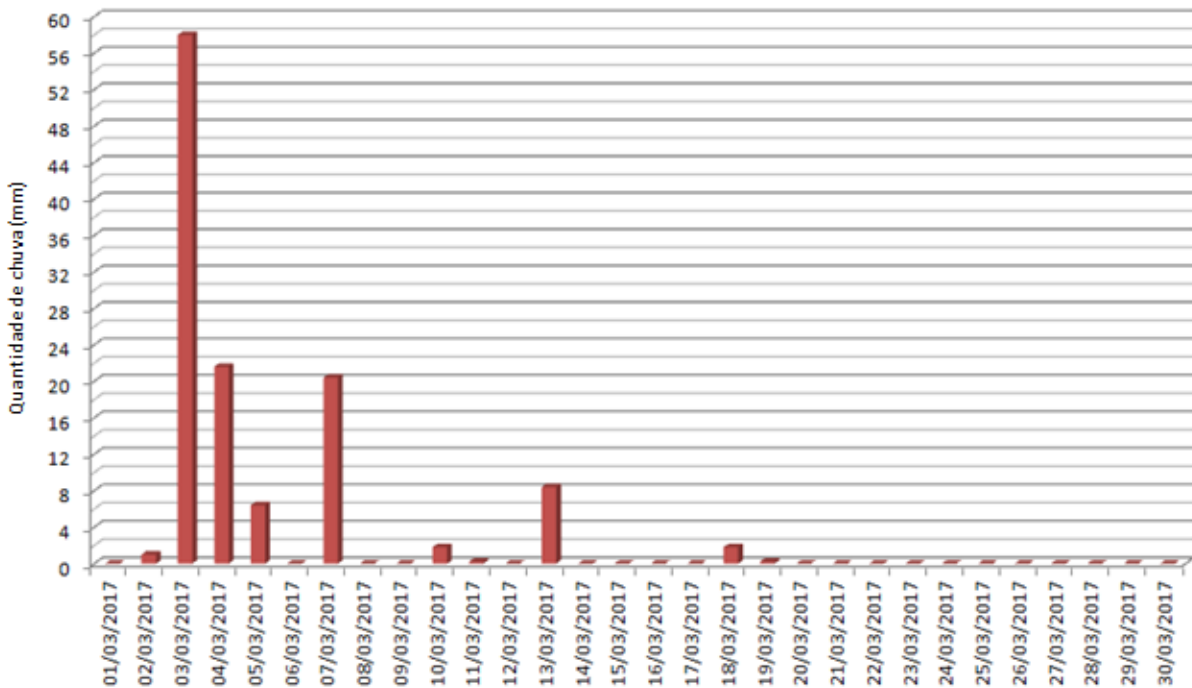
Data - 25/02/2017 - Quantidade total de chuva: 3,6 mm		
Registros da estação meteorológica		Registros do arquivo .CSV
Horário	Quantidade de chuva (mm)	
1h40	0,6	01:37:21; Ciclo (1 de 2) iniciado; 418; s2
1h50	0,4	01:37:57; Ciclo (2 de 2) iniciado; 418; s2
2h00	0,2	01:38:32; Limpeza encerrada; 418; s0
18h00	0,4	
18h20	0,2	
18h50	0,4	
19h00	0,4	
19h10	0,4	
19h20	0,2	
19h30	0,2	
20h10	0,2	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em março, o índice pluviométrico registrado pela estação meteorológica de Departamento de Engenharia Rural (FCA/Unesp/Botucatu) foi 119,8 mm. Assim como ocorreu no mês anterior, o valor ficou abaixo das médias históricas para o mês. Se forem considerados apenas os últimos onze anos, isto representa 21,87 mm abaixo da média. Já quando observada a média para o mês a partir de 1971 até 2016, isso significa 50,78 mm a menos. As quantidades diárias de chuva são apresentadas na Figura 64.

Apesar do nível de chuva ter ficado abaixo da média histórica no mês de março, este foi o período em que mais ocorreram testes do mecanismo de limpeza dos espelhos do heliostato em situações reais. Optou-se por ampliar o número de testes dada a regularidade de operação que o dispositivo apresentou nos meses anteriores. No total, foram executados 27 ciclos de limpeza, sendo 14 iniciados manualmente e 13 em modo automático.

Figura 64 - Índices pluviométricos diários referentes ao mês de março de 2017



Fonte: Elaborada pelo autor.

Diferentemente dos meses anteriores, onde não foram constatadas situações adversas ao funcionamento do dispositivo, fez-se necessário, no dia 23/03/2017, uma simples, porém importante, manutenção no sistema: a lubrificação, com base em vaselina, dos trilhos onde correm os *trolleys* de movimentação da escova (estrutura em formato C). Isso auxiliou na uniformidade de movimentação do sistema, bem como na manutenção do correto tensionamento dos cabos de aço.

A Tabela 18, a seguir, apresenta os dados sobre os índices pluviométricos registrados pela estação meteorológica, bem como as operações de limpeza realizadas durante o mês de março de 2017.

Tabela 18 - Comparação entre os dados pluviométricos da estação meteorológica e ciclos de limpeza (mar/2017)

Data	Quantidade de chuva (mm)	Ciclos de limpeza	Tipos de ciclo	Horários
01/03/2017	0	0	-	
02/03/2017	1	14	S3; S3; S3; S5	14h45; 14h48; 15h21; 15h24
03/03/2017	58	3	S3	1h59

04/03/2017	21,6	0	-	
05/03/2017	6,4	0	-	
06/03/2017	0	0	-	
07/03/2017	20,4	0	-	
08/03/2017	0	0	-	
09/03/2017	0	0	-	
10/03/2017	1,8	3	S3	19h54
11/03/2017	0,2	0	-	
12/03/2017	0	0	-	
13/03/2017	8,4	0	-	
14/03/2017	0	0	-	
15/03/2017	0	0	-	
16/03/2017	0	0	-	
17/03/2017	0	0	-	
18/03/2017	1,8	5	S5	9h47
19/03/2017	0,2	2	S2	2h58
20/03/2017	0	0	-	
21/03/2017	0	0	-	
22/03/2017	0	0	-	
23/03/2017	0	0	-	
24/03/2017	0	0	-	
25/03/2017	0	0	-	
26/03/2017	0	0	-	
27/03/2017	0	0	-	
28/03/2017	0	0	-	
29/03/2017	0	0	-	
30/03/2017	0	0	-	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como feito em relação aos meses de janeiro/2017 e fevereiro/2017, realizou-se a comparação dos dados contidos no arquivo .CSV gerado pelo mecanismo de limpeza e os dados pluviométricos advindos da estação meteorológica. Foram detalhados somente os dias nos quais ocorrem ciclos de limpeza.

A Tabela 19, a seguir, refere-se às atividades de limpeza realizadas no dia 02/03/2017.

Tabela 19 - Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 02/03/2017

Data - 02/03/2017 - Quantidade total de chuva: 1,0 mm		
Registros da estação meteorológica		Registros do arquivo .CSV
Horário	Quantidade de chuva (mm)	
14h50	0,6	14:45:11; Ciclo (1 de 3) iniciado; 431; s3
15h30	0,2	14:45:47; Ciclo (2 de 3) iniciado; 431; s3
15h40	0,2	14:46:23; Ciclo (3 de 3) iniciado; 431; s3 14:46:58; Limpeza encerrada; 431; s0 14:48:22; Ciclo (1 de 3) iniciado; 417; s3 14:48:58; Ciclo (2 de 3) iniciado; 417; s3 14:49:33; Ciclo (3 de 3) iniciado; 417; s3 14:50:09; Limpeza encerrada; 417; s0 15:21:02; Ciclo (1 de 3) iniciado; 356; s3 15:21:38; Ciclo (2 de 3) iniciado; 356; s3 15:22:14; Ciclo (3 de 3) iniciado; 356; s3 15:22:49; Limpeza encerrada; 356; s0 15:24:52; Ciclo (1 de 5) iniciado; 366; s5 15:25:28; Ciclo (2 de 5) iniciado; 366; s5 15:26:04; Ciclo (3 de 5) iniciado; 366; s5 15:26:40; Ciclo (4 de 5) iniciado; 366; s5 15:27:16; Ciclo (5 de 5) iniciado; 366; s5 15:27:51; Limpeza encerrada; 366; s0

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 20 apresenta os dados do dia 03/03/2017, a quantidade de operações de limpeza realizadas, respectivos horários destes acionamentos e a comparação com os dados provenientes da estação meteorológica. Nota-se que o comando “s3” foi iniciado às 01h59m01s; quando o sensor de chuva apresentava valor 318 e a estação meteorológica registrava um índice de chuva igual a 0,2 mm. Todo o processo levou menos de dois minutos, sendo finalizado às 02h00m47s.

Tabela 20 - Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 03/03/2017

Data - 03/03/2017 - Quantidade total de chuva: 58,0 mm		
Registros da estação meteorológica		Registros do arquivo .CSV
Horário	Quantidade de chuva (mm)	
2h00	0,2	01:59:01; Ciclo (1 de 3) iniciado; 318; s3
5h20	5,4	01:59:36; Ciclo (2 de 3) iniciado; 318; s3
5h30	7,8	02:00:11; Ciclo (3 de 3) iniciado; 318; s3
5h40	4,2	02:00:47; Limpeza encerrada; 318; s0

5h50	1,4	
6h00	0,4	
6h10	0,2	
6h20	0,6	
6h30	0,4	
6h40	0,2	
17h40	2,8	
17h50	0,8	
18h40	0,2	
18h50	0,2	
19h00	0,4	
19h10	1,2	
19h20	4,8	
19h30	6,4	
19h40	4,4	
19h50	0,2	
20h10	0,4	
20h20	0,8	
20h30	1,8	
20h40	1,2	
20h50	0,8	
21h00	0,6	
21h10	0,6	
21h20	0,8	
21h30	1,2	
21h40	2	
21h50	0,4	
22h00	0,8	
22h10	1	
22h20	0,8	
22h30	0,8	
22h40	0,4	
22h50	0,4	
23h00	0,4	
23h10	0,2	
23h20	0,2	
23h50	0,2	

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 65, a seguir, retrata a realidade dos espelhos componentes do heliostato no dia 09/03/2017, ou seja, após os ciclos de limpeza realizados nos dias 02/03/2017 e 03/03/2017. Nota-se, tanto no item A como no item B, a eficiência do mecanismo proposto, visto a situação em que se encontravam as superfícies espelhadas, praticamente sem sujeira, apresentando boa refletividade.

Figura 65 - Situação da sujeira nos espelhos registrada em 09/03/2017



Na Tabela 21, são apresentados dados relacionados às ações de limpeza realizadas em 10/03/2017. Uma operação composta por três ciclos foi iniciada automaticamente às 19h54, quando detectado um nível de chuva igual a 451.

Tabela 21 - Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 10/03/2017.

Data - 10/03/2017 - Quantidade total de chuva: 1,8 mm		
Registros da estação meteorológica		Registros do arquivo .CSV
Horário	Quantidade de chuva (mm)	
20h00	0,6	19:54:27; Ciclo (1 de 3) iniciado; 451; s3
20h10	1	19:55:02; Ciclo (2 de 3) iniciado; 451; s3
20h20	0,2	19:55:38; Ciclo (3 de 3) iniciado; 451; s3
		19:56:14; Limpeza encerrada; 451; s0

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 66 mostra a situação dos espelhos que compõem o heliostato no dia 16/03/2017, às 8h30 da manhã. É possível observar que os mesmos encontram-se em uma condição satisfatória em relação à refletividade, com apenas alguns pontos isolados de sujeira em suas superfícies, esta sendo proveniente de circunstâncias

naturais relacionadas ao período em que não sofreram ações por parte do mecanismo.

Figura 66 - Situação da sujidade nos espelhos registrada em 16/03/2017 (período da manhã)



Coincidentemente, no mesmo dia, por volta das 10h da manhã, ocorreram operações de corte de grama nas imediações do Departamento de Engenharia Rural, onde está localizado o heliostato. A Figura 67, a seguir, mostra como os procedimentos realizados pelas máquinas de corte de grama influenciaram a sujidade dos espelhos: pode-se notar que, pela ação do vento, em questão de algumas horas, houve grande acúmulo de partículas de terra (poeira) nas superfícies dos mesmos. Ainda que estas partículas não estejam completamente sedimentadas por meio da ação da umidade ou mesmo do orvalho, já diminuem a taxa de refletividade dos espelhos. Na mesma imagem, é possível ver, inclusive, o exato momento em que um trator passa próximo ao heliostato, realizando o apanhado da grama remanescente no local.

Figura 67 - Situação da sujidade nos espelhos registrada no dia 16/03/2017, durante e após o corte da grama



Os dados referentes aos ciclos de limpeza realizados no dia 18/03/2017, são apresentados na Tabela 22. Observa-se uma grande quantidade de operações realizadas (S5, totalizando cinco ciclos), visto que houve a necessidade de maior

rigor na limpeza dos espelhos após os fatos registrados no dia 16/03/2017.

Tabela 22 - Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 18/03/2017

Data - 18/03/2017 - Quantidade total de chuva: 1,8 mm		
Registros da estação meteorológica		Registros do arquivo .CSV
Horário	Quantidade de chuva (mm)	
9h50	0,2	09:47:02; Ciclo (1 de 5) iniciado; 326; s5
13h20	0,2	09:47:39; Ciclo (2 de 5) iniciado; 326; s5
15h50	0,2	09:48:15; Ciclo (3 de 5) iniciado; 326; s5
18h40	0,8	09:48:51; Ciclo (4 de 5) iniciado; 326; s5
18h50	0,2	09:49:27; Ciclo (5 de 5) iniciado; 326; s5
19h10	0,2	09:50:03; Limpeza encerrada; 326; s0

Fonte: Elaborada pelo autor.

No dia 19/03/2017, mais uma operação composta por dois ciclos de limpeza foi realizada, conforme detalhes mostrados na Tabela 23. O primeiro ciclo teve início às 02h58m07s e o segundo, 36 segundos depois. O nível de chuva registrado no momento de acionamento do mecanismo era 334 e a estação meteorológica registrou, neste dia e em horário próximo, 0,2 mm de chuva.

Tabela 23 - Dados pluviométricos da estação meteorológica e os ciclos de limpeza em 19/03/2017

Data - 19/03/2017 - Quantidade total de chuva: 0,2 mm		
Registros da estação meteorológica		Registros do arquivo .CSV
Horário	Quantidade de chuva (mm)	
3h00	0,2	02:58:07; Ciclo (1 de 2) iniciado; 334; s2 02:58:43; Ciclo (2 de 2) iniciado; 334; s2 02:59:19; Limpeza encerrada; 334; s0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Destaca-se que, no dia 23/03/2017, houve a necessidade de lubrificar as estruturas em "C" por onde transitam os *trolleys* que sustentam e movimentam a escova de limpeza. Tal operação incluiu a aplicação de vaselina no interior dos trilhos e levou cerca de quinze minutos. Sem isso, constatou-se a possibilidade da ocorrência de desuniformidade no movimento dos *trolleys* localizados nas laterais do mecanismo, o que prejudica o suave deslizamento das rodas de nylon, acarreta no

desalinhamento da escova de limpeza e, inclusive, vem a prejudicar o correto tensionamento dos cabos de aço componentes do sistema.

Os últimos testes do mecanismo foram realizados em 28/03/2017, desta vez com o heliostato configurando diferentes inclinações. Por meio da Figura 68, a seguir, nota-se que o dispositivo automático de limpeza não afeta a movimentação do heliostato, tanto horizontal, quanto verticalmente (eixos X e Y).

Figura 68 - Mecanismo de limpeza e movimentação do heliostato em diferentes inclinações nos eixos X e Y



Apesar do fato de o mecanismo ter sido planejado, desde o início, para entrar em funcionamento quando o heliostato estivesse em posição de segurança (*stow position*), pois, hipoteticamente, a usina CSP não estaria em funcionamento com tempo nublado ou chuvoso, pelo fato da não incidência (ou dos baixos valores) de radiação solar direta no campo, optou-se por realizar testes acionando o dispositivo de limpeza com o heliostato em diferentes configurações de inclinações nos eixos X

e Y. Nestes testes, foram constatadas dificuldades na ação do dispositivo quando o heliostato encontrava-se com grande inclinação em seu eixo vertical (Y). Assim, registra-se que o torque dos motores utilizados pelo sistema (9,12 N.m ou 93Kg.cm) limita a ação do mecanismo quando as superfícies espelhadas do heliostato encontram-se inclinadas a 23° em relação ao solo. Considerando que na posição de segurança os espelhos e o solo são perfeitamente paralelos, em valores de inclinação maiores do que 23° o motor responsável pelo movimento de retorno da escova de limpeza demonstrou não apresentar força suficiente para que a mesma retornasse à sua posição original. Essa limitação, porém, não desvaloriza a eficácia das operações de limpeza e a eliminação da sujidade quando os espelhos se encontram em valores baixos de inclinação no eixo Y.

Com base nas operações realizadas entre 24/01/2017 e 30/03/2017, considera-se, portanto, que estas foram suficientes para constatar a eficácia do mecanismo, visto que a aplicação do mesmo sempre resultou em situações positivas da refletividade dos espelhos que compõem o heliostato. Isso torna-se evidente, principalmente, na comparação de três cenários identificados em período diferentes:

- a) A situação da sujidade dos espelhos em novembro/2016 e como os mesmos ficaram após as operações de limpeza realizadas no mês de janeiro/2017;
- b) A questão da sujidade nos espelhos identificada após as manutenções prediais e o corte de grama realizado em fevereiro/2017, incluindo o período de estiagem entre 08 e 16/02/2017, e a situação na qual as superfícies espelhadas se encontravam após as operações de limpeza realizadas em datas posteriores no mesmo mês;
- c) A situação em que os espelhos se encontravam na primeira quinzena do mês de março, com alta refletividade; a ocorrência do corte de grama nas imediações do heliostato no dia 16/03/2017; e a forma com que a refletividade se apresentou logo após os ciclos de limpeza realizados na segunda metade do mês de março.

A operação da interface homem-máquina, tanto por meio do programa CoolTerm, quanto pelo aplicativo BlueTerm mostrou-se viável em termos de usabilidade: ambos os sistemas permitiram ao usuário a compreensão sobre sua adequação em condições de uso particulares; mostraram-se ser de fácil

aprendizado, memorização e utilização; foram eficientes e trouxeram resultados confiáveis; demonstraram capacidade de recuperação de erros; e apresentaram interfaces gráficas adequadas. Ainda, nos dois casos, a gravação dos arquivos de texto que se tornam os históricos das operações (arquivos .CSV) ocorreram sempre de maneira correta. Durante todo o período de testes, não ocorreram dúvidas em relação à operacionalidade das aplicações escolhidas, seja por meio do computador ou dispositivo móvel.

Por fim, na única ocasião em que o mecanismo necessitou de manutenção, ou seja, lubrificação das estruturas nas quais se locomovem os *trolleys* de movimentação da escova de limpeza, esta foi feita de maneira rápida e eficiente.

Dado que o objetivo geral da pesquisa focou no desenvolvimento de um mecanismo automatizado para realizar a limpeza de superfícies refletoras de heliostatos em usinas CSP de torre central e que todo o processo deveria respeitar padrões de eficácia da limpeza, visar o baixo custo de produção e instalação e a minimização dos impactos ambientais pertinentes, considera-se que os quesitos de êxito de operação e manutenção foram atendidos e explanados neste item. Em relação aos custos de produção e operação, estes serão elucidados no item posterior.

1.4.5 Custos do projeto

De acordo com Pfhal (2015b) e também com base nas pesquisas realizadas por Wolfertstetter (2013); Sarver et al. (2013); e Costa et al. (2016), estima-se que os custos relacionados à limpeza dos espelhos em usinas CSP de torre central variam de 8€/m²/ano até 25€/m²/ano, dependendo das condições do local, que podem favorecer o fenômeno *soiling*, e os custos relacionados à mão de obra para tal operação.

Por meio de visitas realizadas em feiras e exposições voltadas aos empreendimentos relacionados à energia solar no Brasil, encontrou-se uma empresa localizada no Estado de Goiás que comercializa uma máquina com a finalidade de realizar a limpeza de painéis fotovoltaicos. Trata-se de uma escavadeira de 1.600 Kg

adaptada com uma escova formada por cerdas de borracha, uma carreta tanque para armazenamento de até 700 litros de água e um sistema de mangueiras conectadas, conforme mostrado na Figura 69.

Figura 69 - Escavadeira adaptada para limpeza de painéis fotovoltaicos



Este equipamento pode ser utilizado na lavagem de painéis fotovoltaicos de até 2,10 metros de comprimento e, segundo informações fornecidas pela empresa, utiliza de 550 até 660 litros de água por hora, dependendo da quantidade de sujeira acumulada nesses painéis. Além disso, é possível regular a pressão dos jatos de água.

Como se trata de um maquinário pesado adaptado para realização da limpeza de painéis fotovoltaicos, indagou-se o fornecedor sobre o tempo de preparação (*setup*) da máquina. Supondo que a escavadeira esteja com a concha conectada, a empresa informou que levaria cerca de quinze minutos para desdobrar o braço com a concha e desconectar as mangueiras. Posteriormente, mais vinte minutos para conectar a escova e a carreta tanque. Os procedimentos são feitos por meio da

utilização de pinos e mangueiras. Adicionalmente, notou-se a necessidade de instalação de uma bomba d'água acionada por uma bateria comum de 100 amperes.

Foram levantadas, também, informações sobre as dimensões do(s) equipamento(s), sintetizadas na Tabela 24.

Tabela 24 - Dimensões da escavadeira adaptada para limpezas de painéis fotovoltaicos

Componente	Medida
Comprimento da escova total	2,20 m
Comprimento do rolo de limpeza	2,10 m
Altura atingida	4,30 m
Comprimento da máquina	3,50 m
Altura da máquina	2,30 m
Comprimento da carreta tanque	1,70 m
Altura da carreta tanque	1,85 m
Comprimento total da máquina	7,40 m

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, a empresa esclareceu que as adaptações (escova rotatória e carreta tanque) numa escavadeira nova teriam em um custo de R\$ 49.000,00, à vista.

Atualmente, o preço médio de venda de uma escavadeira de 1.600 Kg nova em uma concessionária é R\$ 110.000,00. Assim, considera-se que o conjunto teria um custo total de R\$ 159.000,00 para aquisição.

Em relação ao mecanismo apresentado neste estudo, seu custo pode ser dividido em produção da estrutura mecânica; confecção do rolo e cerdas de limpeza; e custos dos componentes elétricos e eletrônicos.

No caso da estrutura mecânica, o valor total investido foi de R\$ 2.410,00; sendo este categorizado conforme as informações sintetizadas na Tabela 25.

Tabela 25 - Custos da estrutura mecânica

Componente	Valor (R\$)
Aquisição de materiais (elementos de fixação; materiais para pintura e acabamento; materiais não ferrosos; materiais ferrosos; mancais e rolamentos).	470,00
Serviços de torno (confeção de roldana de nylon; carretel para cabo; pontas de eixo; buchas de alumínio; pinos; buchas da trava; pinos para roldanas; e pino guia para cabo).	520,00
Serviços de solda (confeção da estrutura)	510,00
Serviços de torno (oxicorte e dobra).	600,00
Serviços de torno (material - aço 1020)	310,00
Total	2.410,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

O cabo de aço revestido utilizado na confecção do dispositivo apresentou custo de R\$ 1,16/metro. Como fez-se uso de 30 metros deste material, então seu custo total foi R\$ 34,90

A escova com as cerdas de limpeza teve de ser confeccionada sob medida por uma empresa especializada em escovas industriais localizada na cidade de São Paulo-SP. Este componente possui base em polipropileno, tendo 40 mm de diâmetro externo, 2580 mm de comprimento e 26 mm diâmetro interno, com cerdas de nylon medindo 0.15mm de espessura. O custo total deste componente foi R\$ 720,00.

Os custos relacionados aos componentes elétricos e eletrônicos são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Custos dos componentes elétricos e eletrônicos

Componente	Quantidade	Valor unitário	Valor total
Módulo Bluetooth HC-06	1	R\$ 19,00	R\$ 19,00
Módulo Real Time Clock (RTC) DS1302	1	R\$ 4,90	R\$ 4,90
Sensor de chuva	1	R\$ 7,00	R\$ 7,00
Arduino ATmega2560	1	R\$ 49,90	R\$ 49,90
Motor vidro elétrico 12V	2	R\$ 44,90	R\$ 89,80
Contatores 127V 10A	3	R\$ 95,00	R\$ 285,00
Bloco auxiliar contator	2	R\$ 9,50	R\$ 19,00
Fonte de alimentação 110/12V/20A	1	R\$ 47,90	R\$ 47,90
Disjuntores	4	R\$ 7,50	R\$ 30,00

Quadro de comando (40x30x20cm)	1	R\$ 139,00	R\$ 139,00
Módulo relé SRD-05VDC-SL-C	3	R\$ 5,40	R\$ 16,20
Sensor indutivo LJ12A3-4-Z/BX	2	R\$ 29,90	R\$ 59,80
Cabos diversos	30 metros	R\$ 0,60 (metro)	R\$ 18,00
Total			R\$ 785,50

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, o custo total de construção do mecanismo foi R\$ 3.950,40. Ressalta-se que, para os fins deste estudo, todos os componentes foram adquiridos no varejo e que a aquisição em grande quantidade dos mesmos pode diminuir este valor.

No caso da escova composta pelas cerdas de *nylon*, indagou-se a empresa fornecedora sobre o valor do componente caso fosse necessária a produção de cem itens ou mais. O valor informado pela empresa foi R\$ 645,00; ou seja, 11,5% a menos do que a produção de uma única peça.

Em relação à parte mecânica, mais especificamente sobre as operações relacionadas à confecção da estrutura, questionou-se a empresa prestadora de serviços sobre um possível barateamento, caso houvesse a necessidade de elaborar cem dispositivos ou mais. Verificou-se que poderia haver desconto de 10% nos serviços de torno que não envolvessem oxicorte e dobra e o mesmo percentual poderia ser aplicado aos serviços de solda e montagem, sendo:

- a) Serviços de torno (confecção de roldana de *nylon*; carretel para cabo; pontas de eixo; buchas de alumínio; pinos; buchas da trava; pinos para roldanas; e pino guia para cabo): R\$ 468,00;
- b) Serviços de solda: R\$ 459,00;
- c) Serviços de torno (aço 1020): R\$ 279,00.

Conseqüentemente, o custo total da estrutura mecânica, caso a produção fosse numa quantidade superior a cem itens, seria R\$ 2.276,00.

Alguns componentes elétricos e eletrônicos, quando adquiridos em grande quantidade, também influenciariam na redução dos custos de produção do mecanismo de limpeza. As informações sobre este fato estão compiladas na Tabela 27. Estão detalhados os dados sobre os itens, o fornecedor pesquisado, a quantidade mínima para compra estabelecida pelo fornecedor e, no caso dos

produtos importados da China e Índia, os valores sem considerar a tributação e o valor com inclusão de 60% referentes à tributação.

Tabela 27 - Custos dos componentes elétricos e eletrônicos considerando valores no atacado

Componente	Quantidade	Valor unit. atacado (sem taxas import.)	Valor unit. atacado (com taxas import.)	Valor unit. varejo
Módulo Bluetooth HC-06 (Shenzhen KingSunMicro Tech Co., Ltd. - China)	Min.100 un.	R\$ 2,00	R\$ 3,20	R\$ 19,00
Módulo RTC DS1302 (Okystar Technology Co., Ltd. - China)	Min. 100 un.	R\$ 1,44	R\$ 2,30	R\$ 4,90
Sensor de chuva (Shenzhen Oky Newstar Import & Export Co., Ltd. - China)	Min. 100 un.	R\$ 1,66	R\$ 2,65	R\$ 7,00
Arduino ATmega2560 (Shenzhen Ecooller Electronic Co., Limited - China)	Min. 20 un.	R\$ 14,40	R\$ 23,04	R\$ 49,90
Motor vidro elétrico 12V (Dan Carros - Catanduva - SP)	Min. 10 un.	R\$37,90	-	R\$ 44,90
Contatores 127V 10A (Tangshan Zhengcheng Automation Technology Co., Ltd. - China)	Min. 10 un.	R\$ 42,36	R\$ 67,77	R\$ 95,00
Bloco auxiliar contator (Impex Trading Co. - Índia)	Min. 100 un.	R\$ 4,80	R\$ 7,68	R\$ 9,50
Fonte de alimentação 110/12V/20A (WM Security - São Paulo - SP)	Min. 10 un.	R\$ 35,88	-	R\$ 47,90
Disjuntores (Andeli Group - Guangzhou, China)	Min. 100 un.	R\$ 2,00	R\$ 3,20	R\$ 7,50
Quadro de comando (40x30x20cm) (Nubox - São Paulo - SP)	Min. 10 un.	R\$ 120,60	-	R\$ 139,00
Módulo relé SRD-05VDC-SL-C (Shenzhen ZKP Intelligent Technology Co., Ltd. - China)	Min. 50 un.	R\$ 1,60	R\$ 2,56	R\$ 5,40
Sensor indutivo LJ12A3-4-Z/BX (Yueqing Aotoro Electric Automation Co., Ltd. - China)	Min. 10 un.	R\$ 8,05	R\$ 12,88	R\$ 29,90
Cabo elétrico 1,5mm (Shenzhen Laplink Industry Co., Ltd.)	Min. 10 rolos (100 m cada)	R\$ 25,50 (rolo)	R\$ 40,80 (100 m) R\$ 12,24 (30 m)	R\$ 18,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

A redução de custos na compra dos componentes elétricos e eletrônicos, quando considerada a produção em massa de mecanismos de limpeza, pode chegar a 31%, mesmo com as taxas de importação envolvidas nas negociações com empresas estrangeiras: o montante despendido seria de R\$ 540,62; no atacado, contra R\$ 785,50; no varejo.

Portanto, no caso da produção em massa de dispositivos automáticos de limpeza de espelhos em heliostatos, o custo unitário seria R\$ 3.496,52; ou seja, 12% menor do que a produção de um único exemplar.

Considerando os custos levantados para produção do mecanismo automatizado de limpeza dos espelhos, tanto no varejo quanto no atacado, e o valor a ser investido para aquisição da escavadeira adaptada, ou seja, R\$ 159.000,00; conclui-se que o montante possibilitaria a construção de 40 dispositivos propostos neste estudo, no caso da confecção de um único equipamento, ou 45, quando considerada a produção em massa. Esta última quantidade citada seria quase que totalmente suficiente para automatizar o processo de limpeza dos heliostatos que deverão compor a usina CSP de torre central programada para ser construída na cidade de Caiçara do Rio do Vento/RN, sendo que o projeto inicial prevê um campo solar composto por 47 heliostatos.

Ainda em comparação com a escavadeira adaptada fornecida pela empresa goiana, o mecanismo automático de limpeza de superfícies espelhadas em heliostatos apresenta vantagens relacionadas a ganhos de produção.

Observou-se que, quando as operações de limpeza são executadas com o heliostato situado em posição de segurança, cada ciclo leva 35 segundos para ser completamente realizado. Baseando-se na informação de Fernández-García et al. (2014), que três repetições utilizando água desmineralizada são suficientes para uma limpeza eficaz quando descartada a utilização de detergente, estas três repetições levariam pouco menos de dois minutos para ocorrerem completamente. Apenas a preparação da escavadeira para que esta entre em funcionamento levaria 35 minutos, pois, segundo o fornecedor, a desconexão da concha tomaria cerca de quinze minutos; e conexão da escova e carreta tanque durariam mais vinte minutos.

Além disso, há ganhos de produtividade em relação a mão de obra necessária para operar o sistema. No caso do dispositivo proposto neste estudo, o acionamento manual, seja pelo software ou pelo aplicativo, leva poucos segundos. Também existe a possibilidade de programação para limpeza automática, função que demonstrou ser eficaz durante o período de testes. Para a escavadeira adaptada, tanto sua preparação, quanto operação necessitariam de pessoas alocadas especificamente para tais operações.

Adicionalmente, enquanto um mecanismo automatizado de limpeza está conectado ao heliostato, sem influência em sua estrutura e com a escova devidamente protegida por uma chapa galvanizada com três dobras (toldo), a aquisição da escavadeira adaptada traria mais uma variável: a necessidade de um espaço coberto e fechado para armazenamento de um maquinário de grandes proporções. Muitas vezes isso não é possível, devido às dimensões do terreno disponibilizado para a construção da usina CSP de torre central.

Sobre a manutenção, ressalta-se que os componentes usados na construção do dispositivo automático de limpeza foram cuidadosamente escolhidos para que representassem itens de satisfatória qualidade e baixo custo. Assim, a eventual troca de um cabo de aço, por exemplo, acarretaria num custo de R\$1,16/metro. A lubrificação das calhas por onde se movimentam as rodas de nylon dos *trolleys* faz-se necessária a cada dois meses. Obviamente, este tempo pode ser diminuído. Porém, o custo desta manutenção preventiva é baixo: um pote com 450g de vaselina industrial, atualmente, tem custo médio de R\$ 10,45 no varejo e uma unidade possibilita três aplicações, considerando as dimensões do mecanismo. Caso seja feita a opção por uso de lubrificante multiuso, como, por exemplo, WD-40, uma lata spray de 300 ml custaria, em média, R\$ 29,90 no varejo.

Como a operação do dispositivo faz uso da água da chuva para limpar os espelhos, não há consumo de água proveniente de outras fontes. No caso da escavadeira adaptada, isso já não ocorre. Conforme informado pela empresa fornecedora do equipamento, o mesmo utiliza de 550 até 660 litros de água por hora, dependendo da quantidade de sujeira acumulada nas superfícies a serem limpas. O carro tanque possui capacidade para 700 litros de água. Na região de Botucatu, segundo a dados disponibilizados pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), o gasto de um empreendimento industrial relacionado à água pode variar de R\$ 5,32/m³ até R\$ 10,09/m³. Uma carreta tanque cheia, portanto, representaria um gasto de R\$ 7,06.

Há, ainda, o gasto da escavadeira em relação ao consumo de óleo diesel. Baseando-se no fato de que um maquinário deste porte apresenta um valor médio de potência nominal de 21 HP e empregando-se para usos de intensidade baixa,

média e alta, respectivamente, fatores de potência de 40%, 55% e 75%, o gasto com óleo diesel por hora de trabalho ocorreria conforme mostrado na Tabela 28.

Tabela 28 - Custos do consumo de diesel pela escavadeira

Potência nominal (HP)	Fator de potência	Consumo médio (motor a diesel)	Valor médio do óleo diesel - Botucatu (1litro)	Gasto total (por hora)
21	40%	0,15 l/HP.h	R\$ 2,94	R\$ 3,70
21	55%	0,15 l/HP.h	R\$ 2,94	R\$ 5,09
21	75%	0,15 l/HP.h	R\$ 2,94	R\$ 6,95

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, o gasto com combustível, por hora, de uma escavadeira 1.600 Kg pode variar de R\$ 3,70 até R\$ 6,95; dependendo da intensidade do trabalho.

Por fim, destaca-se que o diesel é o combustível que mais tem influenciado as emissões de dióxido de carbono na atmosfera terrestre, principal gás causador do efeito estufa.

1.5 REFERÊNCIAS

- AEB. Agência Espacial Brasileira. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **ITA inaugura laboratório de computação voltado a energias renováveis**, 2016. Disponível em <<http://www.aeb.gov.br/ita-inaugura-laboratorio-de-computacao-voltado-a-energias-renovaveis/>>. Acesso em 07 fev. 2016.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed., 2008. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em 07 mai. 2015.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Capacidade de geração do Brasil. **Banco de Informações de Geração**, 2016. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 27 mai. 2016.
- ATKEARNEY. **Solar Thermal Electricity 2025** : clean electricity on demand: attractive STE cost stabilize energy production, 2010. Disponível em <https://www.atkearney.de/documents/856314/1214532/BIP_Solar_Thermal_Electricity_2025.pdf>. Acesso em 12 jul. 2016.
- BERMEJO, P.; PINO, F. J.; ROSA, F. Solar absorption cooling plant in Seville. **Solar Energy**, v. 84, p. 1503-1512, 2010.
- BEZERRA, P. H.; TERAMOTO, E. T.; LAMPKOWSKI, M.; SERAPHIM, O. J.; OLIVEIRA, C. E. L.; KOIKE, C. T. Análise estrutural de tiras de espelho curvado e elementos de conexão para heliostato com movimentação em aros. **Anais do VII CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Belo Horizonte, 2016.
- BLACKMON, J. Parametric determination of heliostat minimum cost per unit area. **Solar Energy**, v. 97, p. 342-349, 2013.
- BRANCALIÃO, N. F. S. **Sistemas heliotérmicos**: recurso solar, tecnologia e infraestrutura. Monografia. (Bacharelado em Engenharia Mecânica). Universidade de Brasília, 2015.
- BUCK, R.; GIULIANO, S.; GOBEREIT, b.; PFAHL, A.; PUPPE, M.; SCHWARZBÖZL, P.; UHLIG, R. **Tower CSP technology**: state of the art and market overview. Brasília: Projeto Energia Heliotérmica, 2014.
- BURGALETA, J.; TERNERO, A.; VINDEL, D.; SALBIDEGOITIA, I.; AZCARRRAGA, G. GEMASOLAR: key points for the operation of the plant. **Proceedings of SolarPACES 2012**. Marrakech, Morocco, 2012.
- CASAGRANDE, E. F. Inovação tecnológica e sustentabilidade: possíveis ferramentas para uma necessária interface. **Revista Educação & Tecnologia**, Periódico Técnico-Científico dos Programas de Pós-Graduação em Tecnologia dos CEFETs-PR/MG/RJ, v.8, p. 97-109. Curitiba: CEFET-PR, 2004.

COHEN, G.E.; KEARNEY, D. W.; KOLB, G. J. **Final report on the operation and maintenance improvement program for Concentrating Solar Power Plants**. Sandia National Laboratories, EUA, 1999.

COMETTA, E. **Energia solar: utilização e empregos práticos**. São Paulo: Hemus, 1982.

CORGOZINHO, I. M.; MARTINS NETO, J. H.; CORGOZINHO, A. A. Modelo de simulação de uma planta solar-elétrica utilizando o software Trnsys. **Anais do V CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Recife, 2014.

COSTA, S. C. S.; DINIZ, A. S. A. C.; KAZMERSKI, L. L. Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: literature review update for 2012-2015. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 63, p. 33–61, 2016.

COVENTRY, J.; PYE, J. Heliostat cost reduction: where to now? Solar PACES 2013. **Energy Procedia**, v. 49, p. 60–70, 2014. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214004615>>. Acesso em 15 set. 2014.

CUDDIHY, E. F. Surface soiling: theoretical mechanisms and evaluation of low-soiling coatings. **Proceedings of the Flat-Plate Solar Array Project Research Forum on Quantifying Degradation**. Williamsburg, Virginia, USA, 1983. Disponível em <http://www2.jpl.nasa.gov/adv_tech/photovol/ppr_81-85/Surf%20Soiling%20Theor%20Mech%20-%20Williamsburg1983.pdf>. Acesso em 12 ago. 2016.

CUNHA, L. Relés e contadores. **Revista O Setor Elétrico**, n. 45, out. 2009. Disponível em <<http://www.osetoelettrico.com.br/web/component/content/article/169-reles-e-contadores.html>>. Acesso em 25 mar. 2016.

DIVER, R. B.; GROSSMAN, J. W. **Sandwich construction solar structural facets**. Sandia National Laboratories, EUA, 1998.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

ENERGIA HELIOTÉRMICA. **Como funciona?**, 2016. Disponível em <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/como-funciona>>. Acesso em 09 fev. 2015.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira**. Nota técnica. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, maio, 2012. Disponível em <<http://pt.scribd.com/doc/213250230/NT-EnergiaSolar-2012>>. Acesso em 29 mai. 2014.

EUSTÁQUIO, J. V. C. S. **Simulação e análise do comportamento do campo de heliostatos de uma central de concentração solar termoeleétrica de receptor central**. Dissertação. (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2011.

FELDHOFF, J. F. **Linear Fresnel collectors**: a technology overview. In: SFERA Summer School 2012, Almeria, Spain, 2012. Disponível em <http://sfera.sollab.eu/downloads/Schools/Fabian_Feldhoff_Linear_Fresnel.pdf>. Acesso em 11 jun. 2016.

FERNANDES, F. de M.; LIMEIRA, S. S.; BARBOSA, G. de S. Energia solar: uma investigação sobre políticas públicas do setor no estado da Paraíba. **Revista Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 116 - 128, out./15 a jun./2016.

FERNÁNDEZ-GARCÍA, A.; ÁLVAREZ-RODRIGO, L.; MARTÍNEZ-ARCOS, L.; AGUIAR, R.; MÁRQUEZ-PAYÉS, J. M. Study of different cleaning methods for solar reflectors used in CSP plants. **Energy Procedia**, n. 49, p. 80–89, 2014.

GOERCK, M. **Determinação do potencial energético de um coletor solar fototérmico na região do Vale do Taquari - RS, Brasil**. Dissertação. (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento). Centro Universitário Univates. Lajeado-RS, 2008.

HÄBERLE, A. Linear Fresnel Collectors. In: RICHTER, C.; LINCOT, D.; GUEYMARD, C. A. **Solar Energy**: selected entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. New York: Springer, p. 72-78, 2013.

HICKEL, B. M.; DESCHAMPS, E. M.; NASCIMENTO, L. R. do; RÜTHER, R.; SIMÕES, G. C. Análise da influência do acúmulo de sujeira sobre diferentes tecnologias de módulos FV: revisão e medições de campo. **Anais do VII CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Belo Horizonte, 2016.

HOFFSCHMIDT, B.; ALEXOPOULOS, S.; GÖTTSCHE, J.; SAUERBORN, M.; KAUFHOLD, O. High concentration solar collectors. In: SAYIGH, A (Org.). **Comprehensive Renewable Energy**, Elsevier, 2012.

IEA. International Energy Agency. **How solar energy could be the largest source of electricity by mid-century**. Paris, 2014. Disponível em <<https://www.iea.org/newsroomandevents/pressreleases/2014/september/how-solar-energy-could-be-the-largest-source-of-electricity-by-mid-century.html>>. Acesso em 30 mai. 2016.

KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering**: processes and systems. 1. ed. Academic Press-Elsevier, 2009.

KALTSCHMITT, M.; STREICHER, W.; WIESE, A. **Renewable energy, technology, economics and environment**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.

KOLB, G. J.; JONES, S. A.; DONNELLY, M. W.; GORMAN, D.; THOMAS, R.; DAVENPORT, R.; LUMIA, R. **HelioStat cost reduction study**. SAND 2007-3293, jun. 2007. Disponível em <<http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/2007/073293.pdf>>. Acesso em 15 set. 2014.

LEMOS, L. O.; FERREIRA, A. de M.; JOTA, P. R. da S.; SILVA, A. G. V. Efeito da sujidade no desempenho de módulos fotovoltaicos. **Anais do VII CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Belo Horizonte, 2016.

LODI, C. **Perspectivas para a geração de energia elétrica no Brasil utilizando a tecnologia solar térmica concentrada**. Dissertação. (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

MALAGUETA, D. C. **Avaliação de alternativas para introdução da geração elétrica termossolar na matriz energética brasileira**. Tese. (Doutorado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

MANCINI, T. R. **Solar-electric dish stirling system development**. Sandia National Laboratories, EUA, 1997.

MENDES, J. F. **Aplicações com concentração solar**. In: Seminários - Unidade de Energia Solar (UES) 2013, Edifício Solar XXI, LNEG, Lisboa, 2013. Disponível em <<http://repositorio.Ineg.pt/handle/10400.9/2157>>. Acesso em 30 mai. 2014.

MERROUNI, A.; WOLFERTSTETTER, F., MEZRHABA, S.; PITZ-PAAL, R. Investigation of soiling effect on different solar mirror materials under Moroccan climate. **Energy Procedia**, n. 69, p. 1948 – 1957, 2015.

MIKUSZIES, P. **Umweltauswirkungen von solarthermischen Kraftwerken (Concentrating Solar Power)**. Monografia. (Bacharelado em Engenharia Ambiental). Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Cottbus, Germany, 2015.

MONK, S. **Projetos com Arduino e Android**: use seu smartphone ou tablet para controlar o Arduino. Porto Alegre: Bookman, 2014.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. **Concentrating Solar Power projects**: Kimberlina solar thermal power plant, 2014. Disponível em <http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=37> . Acesso em 10 set. 2016.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. **Concentrating Solar Power projects**: parabolic trough projects, 2016a. Disponível em <http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/parabolic_trough.cfm>. Acesso em 09 ago. 2016.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. **Concentrating Solar Power projects**: power tower projects, 2016b. Disponível em <http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/power_tower.cfm>. Acesso em 12 set. 2016.

ONU. Organização das Nações Unidas. Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD). **Relatório Brundtland: Nosso futuro comum**. Relatório transmitido à Assembleia Geral, anexo ao documento A/42/427 - Desenvolvimento e Cooperação Internacional: Ambiente. Oslo, 1987. Disponível em:

<<http://ambiente.files.wordpress.com/2011/03/brundtland-report-our-common-future.pdf>>. Acesso: 12 jul. 2015.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. São Paulo: Hemus, 1981.

PFAHL, A.; RANDT, M.; HOLZE, C.; UNTERSCHÜTZ, S. Autonomous light-weight heliostat with rim drives. **Solar Energy**, v. 92, p. 230-240, 2013.

PFAHL, A.; BEZERRA, P. H. S.; HÖLLE, E.; LIEDKE, P.; TERAMOTO, E. T.; HERTEL, J.; LAMPKOWSKI, M.; OLIVEIRA, C. E. L. Heliostat tailored to Brazil. **2015 ISES Solar World Congress Conference Proceedings**. Daegu, South Korea, 2015a.

PFAHL, A.; GROSS, F.; LIEDKE, P.; PRAHL, C.; VASQUEZ, F. **Aktuelle Entwicklungen bei Heliostaten**. In: Sonnenkolloquium 2015, Köln, 2015b.

Disponível em

<http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/Soko/Soko2015/Praesentationen/PFAHL_Heliostaten_DLR_2015-05.pdf>. Acesso em 10 ago. 2016.

PITZ-PAAL, R. High temperature solar concentrators. In: GALVEZ, J. B.; RODRIGUES, S. M.; DELYANNIS, E.; BELESSIOTIS, V. G.; BHATTACARYA, S. C.; KUMAR, S. **Solar energy conversion and photo energy system: thermal systems and desalination plants**, v. 1, London: Eolss Publishers, 2010.

POPOV, D. An option for solar thermal repowering of fossil fuel fired power plants. **Solar Energy**, v. 85, p. 344-349, 2011.

PROCÓPIO, O. L.; ILDEFONSO, L. F. N.; MARTINS NETO, J. H.; CORGOZINHO, I. M.; PROCÓPIO, S. L. Concentradores solares Fresnel aplicados à produção de calor para secagem de resíduos sólidos urbanos. **Anais do VII CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Belo Horizonte, 2016.

SANTOS, A. W.; CARDOSO JR., R. A. F. O planejamento do setor elétrico brasileiro à luz do licenciamento ambiental: as perspectivas e potencialidades da energia renovável (eólica e solar) na matriz energética nacional. **Anais do VII CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Belo Horizonte, 2016.

SARVER T.; AL-QARAGHULI, A.; KAZMERSKI, L. L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: history, investigations, results, literature and mitigation approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 698–733, 2013.

SENER. **Tecnologya solar: concluyen con éxito las pruebas de HECTOR**. SENER Noticias Noviembre/November, 2012. Disponível em <http://www.sener.es/revista-sener/es/n44/al_da_nuevos_mercados.html>. Acesso em 01 fev. 2016.

SILVA, M. A. P. da. **Central de produção de energia eléctrica a partir de energia solar térmica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Departamento de Engenharia Mecânica. Lisboa, 2013.

SILVI, C. The work of Italian solar energy pioneer Giovanni Francia (1911-1980). **2005 ISES Solar World Congress Conference Proceedings**. Orlando, FL, USA, 2005.

SOLARGIS. **Solar resource maps for Brazil**: Direct Normal Irradiation (DNI), 2013. Disponível em <<http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/brazil>>. Acesso em 30 mai. 2014.

SOLARGIS. **World solar resource maps**: Direct Normal Irradiation (DNI), 2015. Disponível em <<http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/worldDNI>>. Acesso em 13 jul. 2016.

SOLINOVA. Solinova Inovação Tecnológica e Empresarial. **Sistemas de microturbina solar-híbrida para cogeração de eletricidade e calor para o setor agroindustrial**. Descritivo técnico. Pirassununga, 2013.

STINE, W. B.; DIVER, R. B. **A compendium of solar dish/stirling technology**, Sandia National Laboratories, EUA, 1994. Disponível em <http://www.stage-ste.eu/documents/PD%20Dish_Stirling%20Compendium.pdf>. Acesso em 25 mai. 2016.

STINE, W. B.; GEYER, M. **Power From The Sun**, 2001. Disponível em <<http://www.powerfromthesun.net/book.html>>. Acesso em 23 ago. 2014.

TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Revista Estudos Avançados (EAV)**. Universidade de São Paulo (USP). v. 26, n. 74, p. 249-260, 2012.

VICENTE, C. J.; TEJERINA, P.; MASSABÉ, F.; MARCO, M.; CANDINI, L.; VILLA, J. R. PARIS: a parabolic trough autonomous robotic cleaning system. **Proceedings of SolarPACES 2012**. Marrakech, Morocco, 2012.

WENDEL, M.; COLLE, S.; CARDEML, J. M.; MILLER, F. M. Metodologia para simulação transiente de uma pequena central heliotérmica. **Anais do III Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Belém, 2010.

WOLFERTSTETTER, F. **Reflector soiling and cleaning methods**. In: SFERA Summer School. Hornberg, Germany, 2013. Disponível em <http://sfera.sollab.eu/downloads/Schools/Reflector_Soiling_Fabian_Wolfertstetter_SFERA2013.pdf>. Acesso em 27 ago. 2016.

ZHANG, X.; LIU, X.; WANG, Z. research of the heliostat cleaning method. **Proceedings of ISES World Congress 2007**, p. 1782-1784. Beijing, China, 2007.

ZHU, G.; WENDELIN, T.; WAGNER, M. J.; KUTSCHER, C. History, current state, and future of linear Fresnel Concentrating solar collectors. **Solar Energy**, v. 103, p. 693-652, 2014.

CAPÍTULO 2

O PROCESSO DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE USINAS HELIOTÉRMICAS (CONCENTRATED SOLAR POWER – CSP)

RESUMO

Empreendimentos baseados em tecnologias de energia solar concentrada (Concentrated Solar Power - CSP), também chamada de solar-térmica ou heliotérmica, fazem uso de sistemas de concentração da radiação solar para obtenção de quantidades significativas de fluido a altas temperaturas para aplicação em ciclos térmicos de potência. Em usinas CSP, o calor do sol é captado e armazenado para, depois, ser transformado em energia mecânica e, por fim, em eletricidade. O calor recolhido aquece um líquido (fluido térmico) que passa por um receptor. Esse líquido armazena o calor e serve para aquecer a água dentro da usina e gerar vapor. A partir daí, o vapor gerado movimenta uma turbina e aciona um gerador, produzindo, assim, energia elétrica. No Brasil, apesar do alto índice de radiação solar direta incidente, ainda são escassos os projetos envolvendo a energia heliotérmica e acredita-se que alguns dos fatores que dificultam a adoção e a implementação destas tecnologias no país estão relacionados à complexidade do processo de licenciamento ambiental para construção e operação de usinas CSP e à ausência de uma legislação ambiental específica para empreendimentos baseados na heliotermia. Este artigo se propôs a apresentar os principais aspectos da legislação existente em relação à impactos ambientais e aos processos para a obtenção das licenças ambientais, relacionando-os com as características de usinas CSP. Com base na análise dos requisitos para os procedimentos de licenciamento levantados, foram desenvolvidas propostas para o estabelecimento de diretrizes de licenciamento que são essenciais para o desenvolvimento do mercado CSP no Brasil.

Palavras-chave: energias renováveis, energia solar concentrada, legislação.

ABSTRACT

Concentrated Solar Power (CSP) plants, also called solar-thermal or heliothermal, make use of solar radiation concentration systems to obtain significant quantities of fluid at high temperatures for application in thermal power cycles. The sunlight is captured and stored. Then it is converted into mechanical energy and finally into electricity. The collected heat heats up a liquid (thermal fluid) that passes through a receiver. This liquid stores the heat and serves to heat the water inside the plant and generate steam. From there, the steam moves a turbine and drives a generator, thus producing electric energy. In Brazil, despite the high incidence of direct solar radiation, projects involving heliothermic energy are still scarce and it is believed that some of the factors that hinder the adoption and implementation of these technologies Brazil are related to the complexity of the environmental licensing process for construction and operation of CSP plants and also the absence of a specific environmental legislation for CSP projects. This paper proposes to present the main aspects of the existing legislation in relation to the environmental impacts and the processes to obtain the environmental licenses, relating them to the characteristics of CSP plants. Based on the analysis of the requirements for the licensing procedures raised, proposals were developed for the establishment of licensing guidelines that are essential for the development of the Brazilian CSP market.

Keywords: renewable energies, concentrated solar power, legislation.

2.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico, o consumismo desenfreado, a inserção exorbitante de novas tecnologias no cotidiano da população, o que causa mudanças nos hábitos dos indivíduos, influenciaram o aumento do consumo de energia no mundo. As chamadas fontes fósseis de energia, onde estão inseridos o carvão mineral, o gás natural e o petróleo, tornam-se cada vez mais escassas e, juntamente a isso, existe uma crescente preocupação global com a variável ambiental. Neste cenário, é crescente o número de pesquisas que objetivam encontrar formas sustentáveis de geração de energia, respondendo à crescente demanda e cogitando o uso de fontes energéticas limpas e renováveis.

Energia renovável é uma expressão usada para descrever uma ampla gama de fontes de energia que são disponibilizadas na natureza de forma cíclica, utilizadas para gerar eletricidade ou calor. Dentre as fontes renováveis de energia destacam-se a biomassa, a eólica, a solar, de marés e as pequenas centrais hidroelétricas (PCHs). Todas têm se constituído em alternativas às fontes tradicionais, por serem classificadas como opções ambientalmente corretas (COSTA; PRATES, 2005).

No panorama atual das energias renováveis, a energia solar assume particular relevância. Energia solar é aquela proveniente da obtenção direta de energia do sol, seja por aproveitamento do calor gerado pela sua radiação (energia térmica) usada em aquecimentos de fluidos ou ambientes na geração de potência mecânica ou elétrica, ou ainda, convertendo-a diretamente em energia elétrica por meio de materiais chamados de termoelétricos e/ou fotovoltaicos. A energia obtida por meio de fonte solar é limpa, ou seja, não produz qualquer tipo de poluente, renovável e, portanto, sustentável.

A capacidade de geração de energia elétrica brasileira totalizou 143,6 GW de potência instalada em maio de 2016, referente aos 4.521 empreendimentos em operação, de acordo informações do Banco de Informação da Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Existe uma previsão para os próximos anos de uma adição de 27.362.507 kW na capacidade de geração de

eletricidade do país, proveniente de 209 empreendimentos em construção e mais 626 outorgados (ANEEL, 2016).

No caso do Brasil, a presença de fontes renováveis na matriz energética é significativa, principalmente no que se refere à hidroeletricidade e à biomassa. Em contrapartida, a capacidade instalada de energia proveniente do recurso solar no Brasil representa menos de 1% da matriz energética (ANEEL, 2016). Esta estatística é contrastante em relação à abundante disponibilidade de radiação solar incidente no país. O Brasil apresenta um alto potencial para aproveitamento da fonte solar de energia, pois possui índices de radiação solar global incidente superiores aos encontrados na maioria dos países europeus. Os valores de radiação solar global incidente em qualquer região do território nacional são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650 kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²). Nestes países, os projetos para aproveitamento do recurso solar são amplamente disseminados e alguns contam com grandes subsídios governamentais (SANTOS; CARDOSO JR., 2016).

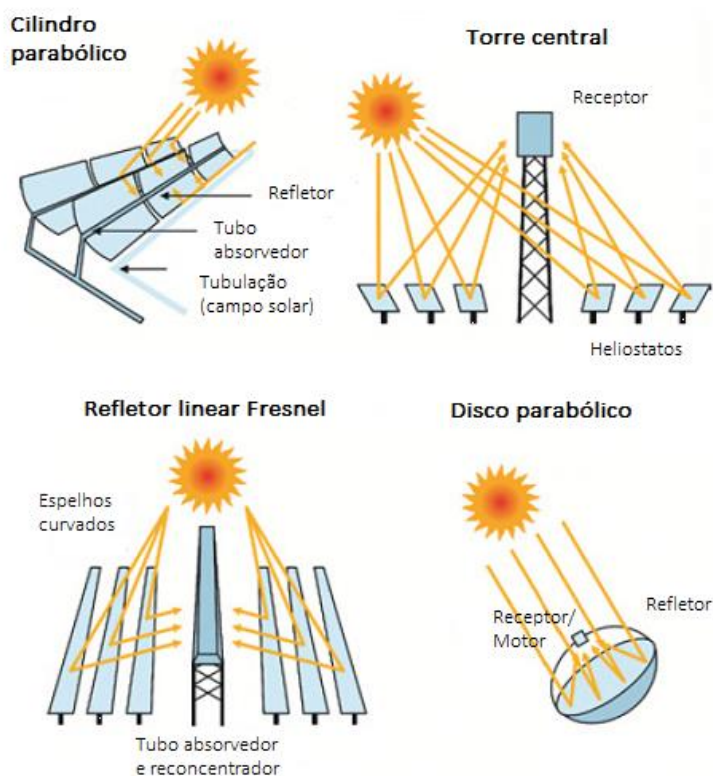
A forma de geração de energia elétrica pela irradiação solar, denominada geração heliotérmica, termossolar ou também *Concentrated Solar Power (CSP)*, consiste, basicamente, na geração de eletricidade por meio da conversão da energia solar em energia térmica, e posterior conversão desta última em energia elétrica. A tecnologia CSP é baseada na utilização de superfícies espelhadas que refletem e concentram a radiação solar direta com o objetivo de convertê-la em energia térmica, a partir da qual se gera vapor d'água que irá acionar um ciclo termodinâmico reversível que converte calor em trabalho, conhecido como Rankine. As tecnologias de energia solar concentrada envolvem as seguintes fases: coleta da radiação solar; concentração da radiação num receptor sob a forma de energia térmica; transporte da energia térmica para o sistema de conversão de energia; conversão da energia térmica em energia elétrica (EPE, 2012).

Existem, atualmente, quatro tipos de tecnologias CSP: calhas/cilindros parabólicos; refletores Fresnel; discos parabólicos; e torre de concentração solar. Estes quatro tipos de CSP diferem-se entre si em relação às estruturas físicas, o formato e dimensões dos espelhos, o movimentação em relação ao sol e, também,

em relação à temperatura atingida pelo fluido de trabalho após o aquecimento (FERREIRA et al., 2016).

O primeiro tipo de tecnologia utiliza espelhos em forma de calhas parabólicas (*parabolic troughs*) com absorvedor disposto na linha focal do coletor, constituído geralmente de um tubo metálico revestido por uma camada de tinta seletiva e envolto por um segundo tubo de vidro, cujo espaço entre os mesmos deve ser evacuado para evitar perdas por convecção. O segundo tipo de tecnologia disponível é a tecnologia Fresnel, que utiliza refletores lineares móveis para concentração da radiação em absorvedor linear fixo. O terceiro tipo é constituído por pratos parabólicos (*parabolic dishes*), que são refletores em formato de paraboloide, na maioria dos casos, com um grupo motor/gerador individual para cada refletor localizado no ponto focal. Finalmente, o quarto tipo de tecnologia é a chamada torre solar (*solar tower*), em que se utilizam milhares de espelhos para concentração dos raios solares em um uma torre central fixa (CORGOZINHO; MARTINS NETO; CORGOZINHO, 2014). A Figura 70 apresenta as principais configurações citadas.

Figura 70 - Quatro tipos de usinas CSP

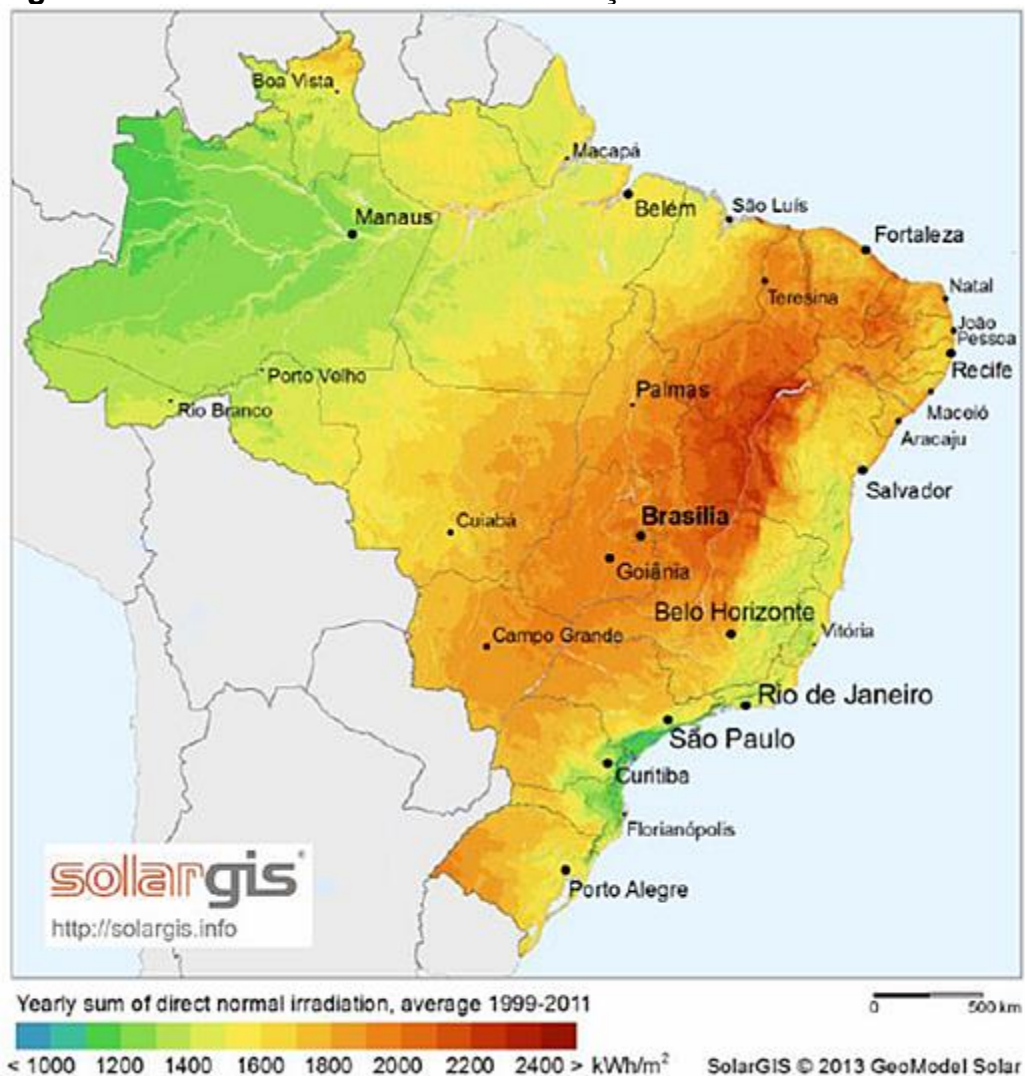


Fonte: Adaptado de BUCK et al. (2014, p. 12).

Nota-se que todos os quatro tipos de tecnologia CSP usam sistemas de rastreamento solar para garantir que os raios sejam refletidos no ponto de interesse.

O incentivo à adoção e implementação de tecnologias CSP no Brasil justifica-se pela abundante disponibilidade de radiação solar direta em todo seu território, principalmente em grandes áreas das regiões Nordeste, Centro-Oeste e parte da região Sudeste, conforme mostrado na Figura 71. Observa-se que a média anual de radiação solar direta incidente em certas regiões pode chegar a 2.400 kWh/m².

Figura 71 - Média de incidência de radiação solar direta no Brasil



Fonte: SOLARGIS (2013).

Conforme visto, embora exista vasta disponibilidade de radiação solar direta no território nacional, o interesse brasileiro pelo uso das tecnologias CSP na geração de energia elétrica é recente. Os poucos projetos pilotos existentes ainda se encontram em fase inicial de implantação e depende do fortalecimento de investimentos em projetos e pesquisa nacional no setor (MALAGUETA, 2013). São escassas as iniciativas para disseminação dos conhecimentos sobre CSP no país. Apenas recentemente, o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), em São José dos Campos/SP, inaugurou um laboratório voltado a energias renováveis com o objetivo dar suporte computacional a atividades de pesquisa envolvendo simulação numérica de processos de transferência de calor e massa, com foco na heliotermia. Além disso destacam-se, também os cursos de formação em energia heliotérmica ministrados pelo Instituto Superior de Inovação e Tecnologia (ISITEC) em parceria com a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) (AEB, 2016). Segundo Goerck (2008), outra barreira encontrada pelos órgãos governamentais e não governamentais, investidores e empresas ligadas ao setor de energia é a falta de informações confiáveis sobre os recursos renováveis, que permitiriam avaliar riscos associados a fatores climático-ambientais envolvidos em projetos de utilização destas fontes de energia.

A compreensão dos impactos ambientais de empreendimentos CSP é a base para diminuir a complexidade do processo de licenciamento ambiental para construção e operação destas usinas no Brasil. Atualmente, as restrições existentes no processo de licenciamento ambiental levam a atrasos desnecessários e aumento significativo de custos durante a fase de planejamento do projeto. Adicionalmente, a ausência de uma legislação ambiental específica para empreendimentos baseados na heliotermia cria mal-entendidos durante a avaliação dessas instalações. Para lidar com essas questões este artigo se propõe a apresentar os principais aspectos da legislação existente em relação à impactos ambientais e processos para a obtenção das licenças ambientais. Objetiva-se o desenvolvimento de propostas para o estabelecimento de diretrizes de licenciamento que se adaptam às plantas CSP.

Considera-se que essa compreensão é essencial para o desenvolvimento do mercado CSP no Brasil. Assim, a perspectiva de contribuição baseia-se na aplicação de tecnologias CP no país e no incentivo ao uso de fontes alternativas de energia

para geração de eletricidade e calor, considerando o potencial desta tecnologia em aplicações com propósitos comerciais ou não-comerciais.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para levantar os aspectos relacionados à avaliação de impactos ambientais e aos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental de empreendimentos, optou-se por utilizar as Resoluções no 01/86 e 237/97 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA.

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 1, de 23 de janeiro de 1986, dispõe sobre as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente.

Em seu artigo 1º, a Resolução nº 01/86 conceitua impacto ambiental como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais.

O Art. 2º da Resolução supracitada cita que dependerá de elaboração de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), a serem submetidos à aprovação do órgão estadual competente e da Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA) - em caráter supletivo, o licenciamento de dezoito atividades modificadoras do meio ambiente, sendo estas:

- I - Estradas de rodagem com duas ou mais faixas de rolamento;
- II - Ferrovias;
- III - Portos e terminais de minério, petróleo e produtos químicos;
- IV - Aeroportos, conforme definidos pelo inciso 1, artigo 48, do Decreto-Lei nº 32, de 18 de setembro de 1966 (Decreto-Lei revogado pela Lei nº 7.565, de 19 de dezembro de 1986);
- V - Oleodutos, gasodutos, minerodutos, troncos coletores e emissários de esgotos sanitários;
- VI - Linhas de transmissão de energia elétrica, acima de 230KV;
- VII - Obras hidráulicas para exploração de recursos hídricos, tais como: barragem para fins hidrelétricos, acima de 10MW, de saneamento ou de irrigação, abertura de canais para navegação, drenagem e irrigação, retificação de cursos d'água, abertura de barras e embocaduras, transposição de bacias, diques;
- VIII - Extração de combustível fóssil (petróleo, xisto, carvão);
- IX - Extração de minério, inclusive os da classe II, definidas no Código de Mineração;

- X - Aterros sanitários, processamento e destino final de resíduos tóxicos ou perigosos;
- XI - Usinas de geração de eletricidade, qualquer que seja a fonte de energia primária, acima de 10MW;
- XII - Complexo e unidades industriais e agroindustriais (petroquímicos, siderúrgicos, cloroquímicos, destilarias de álcool, hulha, extração e cultivo de recursos hídricos);
- XIII - Distritos industriais e zonas estritamente industriais - ZEI;
- XIV - Exploração econômica de madeira ou de lenha, em áreas acima de 100 hectares ou menores, quando atingir áreas significativas em termos percentuais ou de importância do ponto de vista ambiental;
- XV - Projetos urbanísticos, acima de 100 ha ou em áreas consideradas de relevante interesse ambiental a critério da SEMA e dos órgãos municipais e estaduais competentes estaduais ou municipais;
- XVI - Qualquer atividade que utilizar carvão vegetal, derivados ou produtos similares, em quantidade superior a dez toneladas por dia;
- XVII - Projetos agropecuários que contemplem áreas acima de 1.000 ha. ou menores, neste caso, quando se tratar de áreas significativas em termos percentuais ou de importância do ponto de vista ambiental, inclusive nas áreas de proteção ambiental. (acrescentado pela Resolução nº 11/86);
- XVIII - Empreendimentos potencialmente lesivos ao patrimônio espeleológico nacional (acrescentado pela Resolução nº 5/87);

O Art. 5º da Resolução CONAMA nº 01/86 discorre sobre as diretrizes gerais para o EIA, estabelecendo que o mesmo deve:

- I - Contemplar todas as alternativas tecnológicas e de localização do projeto, confrontando-as com a hipótese de não execução do projeto;
- II - Identificar e avaliar sistematicamente os impactos ambientais gerados nas fases de implantação e operação da atividade;
- III - Definir os limites da área geográfica a ser direta ou indiretamente afetada pelos impactos, denominada área de influência do projeto, considerando, em todos os casos, a bacia hidrográfica na qual se localiza;
- IV - Considerar os planos e programas governamentais, propostos e em implantação na área de influência do projeto, e sua compatibilidade.

Ainda no mesmo artigo, cita-se que, na necessidade da execução do EIA, o órgão estadual competente, ou a SEMA ou, no que couber ao Município, deve fixar as diretrizes adicionais que, pelas peculiaridades do projeto e características ambientais da área, forem julgadas necessárias.

As atividades técnicas mínimas de um EIA são definidas no Art. 6º da mesma Resolução. Destaca-se o fato de que o diagnóstico ambiental da área de influência do projeto deve contemplar a descrição e análise dos recursos ambientais e suas interações, tal como existem, de modo a caracterizar a situação ambiental da área,

antes da implantação do projeto, considerando os meios físico, biológico e socioeconômico. Adicionalmente, o Art. 6º estabelece como atividades técnicas a serem apresentadas:

- II - Análise dos impactos ambientais do projeto e de suas alternativas, através de identificação, previsão da magnitude e interpretação da importância dos prováveis impactos relevantes, discriminando: os impactos positivos e negativos (benéficos e adversos), diretos e indiretos, imediatos e a médio e longo prazos, temporários e permanentes; seu grau de reversibilidade; suas propriedades cumulativas e sinérgicas; a distribuição dos ônus e benefícios sociais;
- III - Definição das medidas mitigadoras dos impactos negativos, entre elas os equipamentos de controle e sistemas de tratamento de despejos, avaliando a eficiência de cada uma delas.
- IV - Elaboração do programa de acompanhamento e monitoramento dos impactos positivos e negativos, indicando os fatores e parâmetros a serem considerados.

Instruções adicionais, relacionadas às peculiaridades do projeto ou mesmo da área, podem ser fornecidas pelo órgão estadual competente; ou a SEMA ou quando couber, o município.

O Art. 9º provê as diretrizes sobre o RIMA como parte concluinte do EIA, definindo que o mesmo deverá conter, no mínimo:

- I - Os objetivos e justificativas do projeto, sua relação e compatibilidade com as políticas setoriais, planos e programas governamentais;
- II - A descrição do projeto e suas alternativas tecnológicas e locacionais, especificando para cada um deles, nas fases de construção e operação a área de influência, as matérias primas, e mão de obra, as fontes de energia, os processos e técnicas operacionais, os prováveis efluentes, emissões, resíduos e perdas de energia, os empregos diretos e indiretos a serem gerados;
- III - A síntese dos resultados dos estudos de diagnósticos ambiental da área de influência do projeto;
- IV - A descrição dos prováveis impactos ambientais da implantação e operação da atividade, considerando o projeto, suas alternativas, os horizontes de tempo de incidência dos impactos e indicando os métodos, técnicas e critérios adotados para sua identificação, quantificação e interpretação;
- V - A caracterização da qualidade ambiental futura da área de influência, comparando as diferentes situações da adoção do projeto e suas alternativas, bem como com a hipótese de sua não realização;
- VI - A descrição do efeito esperado das medidas mitigadoras previstas em relação aos impactos negativos, mencionando aqueles que não puderem ser evitados, e o grau de alteração esperado;
- VII - O programa de acompanhamento e monitoramento dos impactos;
- VIII - Recomendação quanto à alternativa mais favorável (conclusões e comentários de ordem geral).

Por fim, fica definido que o RIMA deve ser elaborado e apresentado de forma objetiva e adequada a sua compreensão e que as informações devem estar em linguagem acessível, de preferência ilustradas por mapas, cartas, quadros, gráficos e demais técnicas de comunicação visual, de modo que se possam entender as vantagens e desvantagens do projeto, bem como todas as consequências ambientais de sua implementação.

No caso da Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997, esta dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. Considera-se licenciamento ambiental como procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental, considerando as disposições legais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis ao caso, conforme seu Art. 1º.

Em seu Art. 2º, a Resolução 237/97 define que a localização, construção, instalação, ampliação, modificação e operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras, bem como os empreendimentos capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental, dependerão de prévio licenciamento do órgão ambiental competente, sem prejuízo de outras licenças legalmente exigíveis. A Tabela 29 apresenta os empreendimentos e atividades sujeitos ao licenciamento ambiental.

Tabela 29 - Atividades ou empreendimentos sujeitos ao licenciamento ambiental

Extração e tratamento de minerais

- pesquisa mineral com guia de utilização;
- lavra a céu aberto, inclusive de aluvião, com ou sem beneficiamento;
- lavra subterrânea com ou sem beneficiamento;
- lavra garimpeira;
- perfuração de poços e produção de petróleo e gás natural.

Indústria de produtos minerais não metálicos

- beneficiamento de minerais não metálicos, não associados à extração;
- fabricação e elaboração de produtos minerais não metálicos tais como: produção de material cerâmico, cimento, gesso, amianto e vidro, entre outros.

Indústria de material elétrico, eletrônico e comunicações

- fabricação de pilhas, baterias e outros acumuladores;
 - fabricação de material elétrico, eletrônico e equipamentos para telecomunicação e informática;
-

-
- fabricação de aparelhos elétricos e eletrodomésticos.

Indústria de material de transporte

- fabricação e montagem de veículos rodoviários e ferroviários, peças e acessórios;
- fabricação e montagem de aeronaves;
- fabricação e reparo de embarcações e estruturas flutuantes.

Indústria de madeira

- serraria e desdobramento de madeira;
- preservação de madeira;
- fabricação de chapas, placas de madeira aglomerada, prensada e compensada;
- fabricação de estruturas de madeira e de móveis.

Indústria de papel e celulose

- fabricação de celulose e pasta mecânica;
- fabricação de papel e papelão;
- fabricação de artefatos de papel, papelão, cartolina, cartão e fibra prensada.

Indústria de borracha

- beneficiamento de borracha natural;
- fabricação de câmara de ar e fabricação e condicionamento de pneumáticos;
- fabricação de laminados e fios de borracha;
- fabricação de espuma de borracha e de artefatos de espuma de borracha, inclusive látex.

Indústria de couros e peles

- secagem e salga de couros e peles;
- curtimento e outras preparações de couros e peles;
- fabricação de artefatos diversos de couros e peles;
- fabricação de cola animal.

Indústria química

- produção de substâncias e fabricação de produtos químicos;
- fabricação de produtos derivados do processamento de petróleo, de rochas betuminosas da madeira;
- fabricação de combustíveis não derivados de petróleo;
- produção de óleos /gorduras/ceras vegetais-animais/óleos essenciais vegetais e outros;
- produtos da destilação da madeira;
- fabricação de resinas e de fibras e fios artificiais e sintéticos e de borracha e látex sintéticos;
- fabricação de pólvora/explosivos/detonantes/munição para caça-desporto, fósforo de segurança e artigos pirotécnicos;
- recuperação e refino de solventes, óleos minerais, vegetais e animais;
- fabricação de concentrados aromáticos naturais, artificiais e sintéticos;
- fabricação de preparados para limpeza e polimento, desinfetantes, inseticidas, germicidas e fungicidas;
- fabricação de tintas, esmaltes, lacas, vernizes, impermeabilizantes, solventes e secantes;
- fabricação de fertilizantes e agroquímicos;
- fabricação de produtos farmacêuticos e veterinários;
- fabricação de sabões, detergentes e velas;
- fabricação de perfumarias e cosméticos;
- produção de álcool etílico, metanol e similares.

Indústria de produtos de matéria plástica

- fabricação de laminados plásticos;
- fabricação de artefatos de material plástico.

Indústria têxtil, de vestuário, calçados e artefatos de tecidos

- beneficiamento de fibras têxteis, vegetais, de origem animal e sintéticos;
 - fabricação e acabamento de fios e tecidos;
-

-
- tingimento, estamparia e outros acabamentos em peças do vestuário e artigos diversos de tecidos;
 - fabricação de calçados e componentes para calçados.

Indústria de produtos alimentares e bebidas

- beneficiamento, moagem, torrefação e fabricação de produtos alimentares;
- matadouros, abatedouros, frigoríficos, charqueadas e derivados de origem animal;
- fabricação de conservas;
- preparação de pescados e fabricação de conservas de pescados;
- preparação, beneficiamento e industrialização de leite e derivados;
- fabricação e refinação de açúcar;
- refino / preparação de óleo e gorduras vegetais;
- produção de manteiga, cacau, gorduras de origem animal para alimentação;
- fabricação de fermentos e leveduras;
- fabricação de rações balanceadas e de alimentos preparados para animais;
- fabricação de vinhos e vinagre;
- fabricação de cervejas, chopos e maltes;
- fabricação de bebidas não alcoólicas, bem como engarrafamento e gaseificação de águas minerais;
- fabricação de bebidas alcoólicas.

Indústria de fumo

- fabricação de cigarros/charutos/cigarrilhas e outras atividades de beneficiamento do fumo;

Indústrias diversas

- usinas de produção de concreto;
- usinas de asfalto;
- serviços de galvanoplastia.

Obras civis

- rodovias, ferrovias, hidrovias, metropolitanos;
- barragens e diques;
- canais para drenagem;
- retificação de curso de água;
- abertura de barras, embocaduras e canais;
- transposição de bacias hidrográficas;
- outras obras de arte.

Serviços de utilidade

- produção de energia termoelétrica;
- transmissão de energia elétrica;
- estações de tratamento de água;
- interceptores, emissários, estação elevatória e tratamento de esgoto sanitário;
- tratamento e destinação de resíduos industriais (líquidos e sólidos);
- tratamento/ disposição de resíduos especiais tais como: de agroquímicos e suas embalagens usadas e de serviço de saúde, entre outros;
- tratamento e destinação de resíduos sólidos urbanos, inclusive aqueles provenientes de fossas;
- dragagem e derrocamentos em corpos d'água;
- recuperação de áreas contaminadas ou degradadas.

Transporte, terminais e depósitos

- transporte de cargas perigosas;
- transporte por dutos;
- marinas, portos e aeroportos;
- terminais de minério, petróleo e derivados e produtos químicos;
- depósitos de produtos químicos e produtos perigosos.

Turismo

-
- complexos turísticos e de lazer, inclusive parques temáticos e autódromos.

Atividades diversas

- parcelamento do solo;
- distrito e polo industrial.

Atividades agropecuárias

- projeto agrícola;
- criação de animais;
- projetos de assentamentos e de colonização.

Uso de recursos naturais

- silvicultura;
- exploração econômica da madeira ou lenha e subprodutos florestais;
- atividade de manejo de fauna exótica e criadouro de fauna silvestre;
- utilização do patrimônio genético natural;
- manejo de recursos aquáticos vivos;
- introdução de espécies exóticas e/ou geneticamente modificadas;
- uso da diversidade biológica pela biotecnologia.

Fonte: Elaborada pelo autor com base na Resolução CONAMA nº 237/97.

Ainda em seu Art. 2º, cita-se que caberá ao órgão ambiental competente definir os critérios de exigibilidade, o detalhamento e a complementação daquilo que é mostrado na Tabela 29, levando em consideração as especificidades, os riscos ambientais, o porte e outras características do empreendimento ou atividade.

A licença ambiental para empreendimentos e atividades consideradas efetiva ou potencialmente causadoras de significativa degradação do meio dependerá de prévio EIA e respectivo RIMA, ao qual dar-se-á publicidade, garantida a realização de audiências públicas, quando couber, de acordo com a regulamentação, de acordo com o Art. 3º da Resolução CONAMA 237/97. Ainda, estabelece-se que o órgão ambiental competente, verificando que a atividade ou empreendimento não é potencialmente causador de significativa degradação do meio ambiente, definirá os estudos ambientais pertinentes ao respectivo processo de licenciamento.

O Art. 6º da supracitada Resolução diz respeito à responsabilidade do órgão competente, afirmando que compete ao órgão ambiental municipal, ouvidos os órgãos competentes da União, dos Estados e do Distrito Federal, quando couber, o licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades de impacto ambiental local e daquelas que lhe forem delegadas pelo Estado por instrumento legal ou convênio.

Assim, consta no Art. 5º, parágrafo único da Resolução CONAMA 237/97:

O órgão ambiental estadual ou do Distrito Federal fará o licenciamento de que trata este artigo após considerar o exame técnico procedido pelos órgãos ambientais dos Municípios em que se localizar a atividade ou empreendimento, bem como, quando couber, o parecer dos demais órgãos competentes da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, envolvidos no procedimento de licenciamento.

As licenças que poderão ser expedidas pelo órgão competente são listadas no Art. 8º da Resolução CONAMA 237/97, sendo:

I - Licença Prévia (LP) - concedida na fase preliminar do planejamento do empreendimento ou atividade aprovando sua localização e concepção, atestando a viabilidade ambiental e estabelecendo os requisitos básicos e condicionantes a serem atendidos nas próximas fases de sua implementação;

II - Licença de Instalação (LI) - autoriza a instalação do empreendimento ou atividade de acordo com as especificações constantes dos planos, programas e projetos aprovados, incluindo as medidas de controle ambiental e demais condicionantes, da qual constituem motivo determinante;

III - Licença de Operação (LO) - autoriza a operação da atividade ou empreendimento, após a verificação do efetivo cumprimento do que consta das licenças anteriores, com as medidas de controle ambiental e condicionantes determinados para a operação.

Parágrafo único. As licenças ambientais poderão ser expedidas isolada ou sucessivamente, de acordo com a natureza, características e fase do empreendimento ou atividade.

O Art. 9º determina que o CONAMA definirá, quando necessário, licenças ambientais específicas, observadas a natureza, características e peculiaridades da atividade ou empreendimento e a compatibilização do processo de licenciamento com as etapas de planejamento, implantação e operação.

As etapas do procedimento de licenciamento ambiental são definidas no Art. 10º, sendo:

I - Definição pelo órgão ambiental competente, com a participação do empreendedor, dos documentos, projetos e estudos ambientais, necessários ao início do processo de licenciamento correspondente à licença a ser requerida;

II - Requerimento da licença ambiental pelo empreendedor, acompanhado dos documentos, projetos e estudos ambientais pertinentes, dando-se a devida publicidade;

III - Análise pelo órgão ambiental competente, integrante do SISNAMA, dos documentos, projetos e estudos ambientais apresentados e a realização de vistorias técnicas, quando necessárias;

IV - Solicitação de esclarecimentos e complementações pelo órgão ambiental competente integrante do SISNAMA, uma única vez, em decorrência da análise dos documentos, projetos e estudos

ambientais apresentados, quando couber, podendo haver a reiteração da mesma solicitação caso os esclarecimentos e complementações não tenham sido satisfatórios;

V - Audiência pública, quando couber, de acordo com a regulamentação pertinente;

VI - Solicitação de esclarecimentos e complementações pelo órgão ambiental competente, decorrentes de audiências públicas, quando couber, podendo haver reiteração da solicitação quando os esclarecimentos e complementações não tenham sido satisfatórios;

VII - Emissão de parecer técnico conclusivo e, quando couber, parecer jurídico;

VIII - Deferimento ou indeferimento do pedido de licença, dando-se a devida publicidade.

§ 1º No procedimento de licenciamento ambiental deverá constar, obrigatoriamente, a certidão da Prefeitura Municipal, declarando que o local e o tipo de empreendimento ou atividade estão em conformidade com a legislação aplicável ao uso e ocupação do solo e, quando for o caso, a autorização para supressão de vegetação e a outorga para o uso da água, emitidas pelos órgãos competentes.

§ 2º No caso de empreendimentos e atividades sujeitos ao EIA, se verificada a necessidade de nova complementação em decorrência de esclarecimentos já prestados, conforme incisos IV e VI, o órgão ambiental competente, mediante decisão motivada e com a participação do empreendedor, poderá formular novo pedido de complementação.

Salienta-se que os estudos necessários ao processo de licenciamento deverão ser realizados por profissionais legalmente habilitados e que os custos ficam sob a responsabilidade do empreendedor, inclusive em atividades realizadas pelo órgão ambiental competente sendo passíveis de ressarcimento.

Por fim, em relação à Resolução CONAMA 237/97, cita o seu Art. 12º que o órgão ambiental competente definirá, se necessário, procedimentos específicos para as licenças ambientais, observadas a natureza, características e peculiaridades da atividade ou empreendimento e, ainda, a compatibilização do processo de licenciamento com as etapas de planejamento, implantação e operação. Poderão ser estabelecidos procedimentos simplificados para as atividades e empreendimentos de pequeno potencial de impacto ambiental, que deverão ser aprovados pelos respectivos Conselhos de Meio Ambiente. Ainda, poder-se-á ser admitido um único processo de licenciamento ambiental para pequenos empreendimentos e atividades similares e vizinhos ou para aqueles integrantes de planos de desenvolvimento aprovados, previamente, pelo órgão governamental competente, desde que definida a responsabilidade legal pelo conjunto de empreendimentos ou atividades. Finalmente, seu § 3º estabelece que deverão ser estabelecidos critérios para agilizar e simplificar os procedimentos de licenciamento

ambiental das atividades e empreendimentos que implementem planos e programas voluntários de gestão ambiental, visando a melhoria contínua e o aprimoramento do desempenho ambiental.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Resolução CONAMA nº 1, apesar de ter sido publicada em 1986, passou por modificações importantes, tendo seu Art. 2º alterado pela Resolução nº 11/86; o inciso XVIII acrescentado pela Resolução nº 5/87; e seus Artigos 3º e 7º revogados pela Resolução nº 237/97. Foi com base no Art. 1º desta Resolução que se considerou o conceito de impacto ambiental para se proceder o desenvolvimento deste trabalho.

Ainda, dentre todas as atividades citadas no Art. 2º da Resolução CONAMA no 01/86, destaca-se o que aparece no item XI, sendo: usinas de geração de eletricidade, qualquer que seja a fonte de energia primária, acima de 10MW.

Ressalta-se que os empreendimentos voltados à geração de energia baseados em energia solar de alta temperatura em fases de projeção ou implantação no Brasil possuem potência instalada menor do que 10 MW. É o caso, por exemplo, das usinas CSP de torre central de Caiçara do Rio do Vento/RN e Pirassununga/SP, ambas projetadas para geração de 100 kW. Sobre usinas alicerçadas na tecnologia de calhas parabólicas, espera-se que o empreendimento a ser localizado na cidade de Petrolina/PE tenha capacidade instalada para geração de 1 MW de energia elétrica e que a usina do Vale do Açu/RN possua capacidade para gerar 3 MW.

Com base nos Artigos 5º e 6º da Resolução CONAMA 237/97, compreende-se que, apesar de os órgãos estaduais poderem delegar aos municípios os casos de atividades com impactos ambientais locais - onde se encaixaria a construção de uma usina CSP -, em vários municípios brasileiros isso não ocorre na prática, ou seja, cabe ao órgão estadual específico da área ambiental a total competência em relação à concessão de licenças ambientais, sejam elas de qualquer tipo. No caso do Estado de São Paulo, por exemplo, em muitas cidades compete à Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) a total responsabilidade em relação à concessão de licenças ambientais, sejam elas de qualquer tipo. Essas concessões estão de acordo com a Legislação do Estado de São Paulo, conforme Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, que aprovou o Regulamento da Lei no 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente. Observa-se que a municipalização do licenciamento seria condição

importante para a melhoria dos serviços prestados pelos órgãos estaduais competentes, pois o envolvimento dos municípios permitiria a esses órgãos um melhor foco nos problemas ambientais. Atualmente, na maioria dos municípios do Estado de São Paulo, as atenções da CETESB e do Departamento Estadual de Proteção dos Recursos Naturais (DEPRN) ficam divididas entre esses problemas e aqueles de interesse local, que, com a municipalização, poderiam ser assumidos pelas prefeituras.

Como visto nas Resoluções CONAMA 1/86 e 237/97, as dimensões dos impactos ambientais definem o tipo de licenciamento de projetos de geração de energia no Brasil. Os projetos com impactos menores seguem processos simplificados, enquanto projetos com grandes impactos ambientais seguem as etapas regulares. Por consequência, empreendimentos como a usina CSP baseada em calhas parabólicas, localizada em Petrolina-PE, poderiam seguir procedimentos mais brandos, inclusive pela sua potência instalada, sempre abaixo de 10 MW. A planta-piloto foi classificada como de “médio potencial de impacto” . Atualmente, essa planta está em vias de conseguir a licença prévia, após a conclusão de um exaustivo Estudo Técnico Ambiental (ETA) que analisou o clima, geologia, população, economia da região e natureza socioambiental. A autorização deverá ser a primeira dos três níveis do licenciamento ambiental pelos quais o projeto passará. Concluídos os estudos, o prazo para emissão (ou negação) da licença prévia é de três meses, podendo se estender por mais três meses. Concedida a licença prévia, os próximos passos correspondem aos processos de obtenção das licenças de instalação e de operação.

O prazo para a obtenção da licença de instalação (LI) começa a contar a partir da submissão da documentação ao órgão competente. Em média, no caso de processos regulares envolvendo Relatório de Controle Ambiental (RCA), o tempo é de seis meses; processos regulares envolvendo necessidade de EIA/RIMA levam doze meses; e processos simplificados têm prazo de 60 dias, podendo ser adicionados mais 60 dias..

Em resumo, os documentos necessários para a obtenção da LI são:

- a) Projeto Básico Ambiental (PBA): detalhes sobre projetos ambientais a serem implementados durante a construção. Por analogia, pode-se dizer que o PBA

é o "projeto executivo ambiental". Os relatórios periódicos são enviados à agência ambiental informando o progresso dos programas de PBA. Nesta fase, podem ocorrer inquéritos por parte da agência ambiental. No licenciamento simplificado, este relatório é chamado Relatório Detalhado de Programas Ambientais (RDPA) que é mais simples do que o PBA;

- b) Inventário Florestal: necessário apenas em casos de remoção de vegetação para obter a Autorização de Supressão de Vegetação (ASV);
- c) Plano de Compensação Ambiental: necessário em projetos complexos. De acordo com a Lei Federal, existem recursos de aplicação necessários (dinheiro) em áreas protegidas que podem chegar a até 0,5% do empreendimento. Esta porcentagem varia de acordo com o Estado e também está incluída no licenciamento simplificado.

Como visto anteriormente, na apresentação dos principais pontos das Resoluções CONAMA 01/86 e 237/97, o órgão ambiental competente pode solicitar documentações adicionais relacionadas às peculiaridades do projeto ou mesmo da área do empreendimento.

A LO é emitida após a conclusão do projeto e quando os requisitos estabelecidos nas licenças anteriores forem atendidos. Ele concede o direito para o projeto começar a operar. A aplicação para essa licença ocorre quando as obras estão quase concluídas (geralmente, entre 80-90%). Para esta aplicação, o empreendedor deve apresentar o relatório final de implementação do PBA e atender às condições da LI. O pedido da LO deve ser acompanhado da publicação legal do mesmo. A agência ambiental faz levantamentos de campo, que são baseados nos resultados dos relatórios enviados.

O prazo para a obtenção da LO começa a contar a partir da submissão da documentação ao órgão competente. Em média, no caso de processos regulares envolvendo Relatório de Controle Ambiental (RCA), o tempo é de seis meses; processos regulares envolvendo necessidade de EIA/RIMA levam doze meses; e processos simplificados têm prazo de 60 dias. Além disso, a licença de operação especifica por quanto tempo uma instalação tem permissão para operar. Este período pode variar de quatro a dez anos e, no final da validade da licença, o empreendedor deve solicitar uma nova licença.

Observa-se, portanto, que mesmo com o procedimento simplificado existe a exigência um profundo conhecimento do passo-a-passo necessário para a obtenção das licenças prévia, de instalação e de operação.

Apresenta-se, a partir deste ponto, cinco propostas de simplificação, visando a melhoria do processo de licenciamento ambiental de plantas CSP, relacionadas ao processo de comunicação; o desenvolvimento de uma Resolução do CONAMA específica para as tecnologias CSP; simplificação do processo; e capacitação do setor.

Em um primeiro momento, devem ser preenchidas às lacunas de informação sobre as tecnologias CSP e seus impactos ambientais. Faz-se necessário que os órgãos ambientais interajam com especialistas em CSP e discutam sobre as facilidades comerciais desta tecnologia. A criação de uma rede de relacionamento entre decisores e líderes de opinião torna-se fundamental para a disseminação de conhecimentos sobre o CSP e poderia permitir que esse conhecimento fosse posto em prática nas instituições envolvidas. Portanto, os impactos positivos e negativos desta tecnologia devem ser apresentados e descritos em detalhes. É altamente recomendável a capacitação de especialistas que poderiam, assim, emitir licenças para projetos CSP localmente.

O EIA e o RIMA são os estudos mais complexos existentes e solicitados durante o processo de obtenção da Licença Prévia. Eles avaliam todas as consequências de um projeto para o meio ambiente. Como visto na Resolução CONAMA nº 01/86, o EIA e o RIMA tornaram-se obrigatórios e são exigidos em diversos tipos de projetos. Para empreendimentos que não produzem impacto ambiental significativo, o Relatório de Controle Ambiental (RCA) pode ser adotado, visto que trata-se de um relatório mais simples, em comparação aos dois relatórios anteriores. Em 2001, o CONAMA criou, por meio da Resolução nº 279/01, o Relatório Ambiental Simplificado (RAS). Este relatório tem como objetivo criar um procedimento de licenciamento mais simples e menos burocrático para atividades de baixo impacto ambiental que aumentem a oferta de energia para o sistema energético brasileiro, voltado especialmente para as usinas eólicas e outras usinas baseadas em fontes renováveis. A Resolução CONAMA nº 462/14 foi criada para definir as diretrizes

para licenciamento ambiental de usinas eólicas e indica em que casos este tipo de empreendimento não deve utilizar os procedimentos simplificados, que são:

- a) Formações de dunas, planícies fluviais, manguezais e outras áreas encharcadas;
- b) Dentro da Mata Atlântica e requer remoção de vegetação, de acordo com a Lei nº 11.428/06;
- c) Nas zonas costeiras, de acordo com a Lei 7.661/88;
- d) Dentro de três quilômetros de uma área protegida ambiental;
- e) Áreas utilizadas pelas aves migratórias para alimentação, repouso ou reprodução;
- f) Áreas que podem causar impacto social ou cultural em uma comunidade;
- g) Áreas onde espécies ameaçadas de extinção são encontradas.

Uma vez que foram criados requisitos específicos, as Resoluções nº 279/01 e nº 462/14 facilitaram o processo de licenciamento de projetos de energia eólica. Como consequência, houve um aumento nos investimentos nesta área. A construção de vários parques eólicos no Brasil poderia contribuir gradualmente para um mix sustentável na matriz energética do país. Assim, é altamente recomendável a criação de uma Resolução CONAMA específica para CSP. A legislação necessária para promover as tecnologias CSP deve ser desenvolvida em cooperação com instituições do setor energético envolvidas em diversos aspectos da regulamentação, como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Ministério do Meio Ambiente (MMA) e o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC). O foco inclui métodos de planejamento de energia que integrem CSP, leilões de energia, regulação técnica, licenciamento ambiental e tributação de componentes importados.

Ainda como sugestão, cita-se que, para a construção de usinas CSP, o empreendedor deve ser isento do procedimento regular que exige a apresentação do EIA e do RIMA. Deve ser seguido o procedimento simplificado, apresentando os seguintes relatórios:

- a) RAS (Relatório Ambiental Simplificado);
- b) RCA (Relatório de Controle Ambiental);
- c) PCA (Plano de Controle Ambiental);

d) PRAD (Plano de Recuperação de Áreas Degradadas).

Estes documentos abordam as necessidades de projetos que causam baixos impactos ambientais e não requerem um trabalho tão árduo e detalhado como o EIA e o RIMA.

A Licença Simplificada (LS) deveria ser concedida para a instalação, implantação e operação de projetos e atividades que, no momento do licenciamento, estejam classificados com pequeno ou médio potencial de poluição e em categoria como micro ou pequena degradação. Em alguns casos, existe a possibilidade de obter dispensa de licença. Este tipo de documento pode ser emitido quando se tratar de um projeto-piloto envolvendo institutos de pesquisa, universidades e pequenas e médias empresas. Esta licença só poderia ser emitida pelas Agências Ambientais Federais.

Por fim, sobre a capacitação do setor, sugere-se que a introdução das tecnologias CSP no Brasil ocorra de forma horizontal e que todos os setores da sociedade devem estar cientes dos benefícios e dos riscos ambientais desta tecnologia. Especialmente, as agências competentes e responsáveis pelos processos de licenciamento devem ser convidadas pelo governo, pelas universidades e pelos institutos de pesquisa a participar de seminários e oficinas sobre a tecnologia CSP. O treinamento e a conscientização devem facilitar o processo de comunicação com os empreendedores. O governo brasileiro deve trabalhar em conjunto com a academia, o setor privado e os responsáveis pela formulação de políticas e agências ambientais para desenvolver e demonstrar tecnologias que possam atender às condições do mercado e às normas ambientais.

2.4 REFERÊNCIAS

AEB. Agência Espacial Brasileira. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **ITA inaugura laboratório de computação voltado a energias renováveis**, 2016. Disponível em <<http://www.aeb.gov.br/ita-inaugura-laboratorio-de-computacao-voltado-a-energias-renovaveis/>>. Acesso em 07 fev. 2016.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Capacidade de geração do Brasil. **Banco de Informações de Geração**, 2016. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 27 mai. 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA nº 01/86, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>>. Acesso em 12 jan. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA nº 237/97, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res97/res23797.html>>. Acesso em 12 jan. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA nº 279/01, de 27 de junho de 2001. Estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental simplificado de empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res01/res27901.html>>. Acesso em 13 jan. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA nº 462/14, de 24 de julho de 2014. Estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica em superfície terrestre, altera o art. 1º da Resolução nº 279, de 27 de julho de 2001, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=703>>. Acesso em 13 jan. 2017.

BUCK, R.; GIULIANO, S.; GOBEREIT, b.; PFAHL, A.; PUPPE, M.; SCHWARZBÖZL, P.; UHLIG, R. **Tower CSP technology**: state of the art and market overview. Brasília: Projeto Energia Heliotérmica, 2014.

CORGOZINHO, I. M.; MARTINS NETO, J. H.; CORGOZINHO, A. A. Modelo de simulação de uma planta solar-elétrica utilizando o software Trnsys. **Anais do V CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Recife, 2014.

COSTA, R. C. da; PRATES, C. P. T. **O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado**. BNDES Setorial, 2005. Disponível em <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2436/1/BS%2021%20O%20papel%20das%20fontes%20renov%C3%A1veis_P.pdf>. Acesso em 21 abr. 2017.

FERREIRA, W. R.; BARBOSA FILHO, W. P.; SILVA, L. M. L. da; AZEVEDO, A. C. S. de. Levantamento de Impactos Ambientais na construção e operação de usinas heliotérmicas. **Anais do X CBPE – Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**. Gramado/RS, 2016.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira**. Nota técnica. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, maio, 2012. Disponível em <<http://pt.scribd.com/doc/213250230/NT-EnergiaSolar-2012>>. Acesso em 29 mai. 2014.

GOERCK, M. **Determinação do potencial energético de um coletor solar fototérmico na região do Vale do Taquari - RS**, Brasil. Dissertação. (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento). Centro Universitário Univates. Lajeado-RS, 2008.

MALAGUETA, D. C. **Avaliação de alternativas para introdução da geração elétrica termossolar na matriz energética brasileira**. Tese. (Doutorado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

SANTOS, A. W.; CARDOSO JR., R. A. F. O planejamento do setor elétrico brasileiro à luz do licenciamento ambiental: as perspectivas e potencialidades da energia renovável (eólica e solar) na matriz energética nacional. **Anais do VII CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Belo Horizonte, 2016.

SOLARGIS. **Solar resource maps for Brazil**: Direct Normal Irradiation (DNI), 2013. Disponível em <<http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/brazil>>. Acesso em 30 mai. 2014.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que se refere ao primeiro objetivo específico estabelecido no Capítulo 1, sua consecução foi obtida a partir da pesquisa bibliográfica sobre os diferentes métodos e equipamentos existentes para limpeza de superfícies refletoras usadas em plantas CSP. Observou-se que, no Brasil, não há nenhum tipo de pesquisa especificamente sobre helioteria; apenas sobre painéis fotovoltaicos, o que destaca o ineditismo deste estudo. Mesmo no cenário internacional, as pesquisas sobre o tema mostraram-se escassas, sendo em sua maioria focadas nas instalações CSP existentes nos Estados Unidos, Espanha e Alemanha, tanto de calhas parabólicas, quanto de torre central. Os trabalhos que mais fundamentaram e contribuíram nas decisões sobre o desenvolvimento do mecanismo de limpeza de espelhos componentes de heliostatos apresentado nesta pesquisa foram os de Zhang et al. (2007); Fernández-García et al. (2014) e Mikuszies (2015). Resumidamente, o primeiro facilitou na opção pela estrutura mecânica; o segundo, na questão da utilização de água da chuva para auxiliar o processo de limpeza dos espelhos do heliostato; e o terceiro foi importante para a decisão de não utilizar nenhum tipo de detergente ou outras soluções de limpeza no processo.

Em relação ao segundo objetivo específico proposto no Capítulo 1, destaca-se que em todas as fases, ou seja, desde a concepção da ideia sobre o dispositivo, passando pelas fases de planejamento, construção e instalação do mesmo, foram consideradas os aspectos relacionados ao baixo custo, sem deixar de lado a preocupação com a eficácia de operação, e a minimização de quaisquer impactos ambientais pertinentes. Neste sentido, os materiais utilizados, tanto na parte elétrica e eletrônica, quanto na estrutura mecânica, demonstraram ser satisfatórios e atingiram aos objetivos propostos neste trabalho.

Apenas uma necessidade de adaptação foi identificada durante o processo de instalação do mecanismo, sendo esta relacionada à forma como os sensores indutivos eram fixados na estrutura. Chapas de aço carbono de 1,5 mm foram utilizadas e a readequação fez com que as atividades de acionamento dos sensores indutivos se tornassem mais eficazes e confiáveis. Assim, na eventual construção de

novos dispositivos automáticos de limpeza de superfícies refletoras de heliostatos, esta variação deve ser considerada.

Ainda sobre o segundo objetivo específico estabelecido no Capítulo 2, ressalta-se que, pelo fato de o mecanismo ter sido planejado para ser testado em um único heliostato, optou-se pela conexão via *Bluetooth*. Para instalações de vários mecanismos como o apresentado nesta tese em um campo solar formado por vários heliostatos, destaca-se a necessidade de adequação do código a formas de conexão mais convenientes para o cenário descrito. Considerando os aspectos facilidade de implementação do código e baixo custo de produção do mecanismo, sugere-se o uso do módulo transceptor Wireless 2.4 GHz (NRF24I01) e uma antena para ampliação de seu sinal e, conseqüentemente, área de atuação. O módulo sugerido é um componente eletrônico desenvolvido para enviar e receber informações via *Wireless* (sem fio) entre plataformas de prototipagem e/ou microcontroladores, como o Arduino, utilizado neste trabalho. Apenas a antena interna do componente possibilita comunicação em um raio de até 100 metros em 250 kbps. Com o uso de uma antena de 2.4 GHz (2DB), em uma área aberta e com uma taxa de transmissão de 2 Mbps, seu alcance pode chegar a 520 metros. Já com uma taxa de 1 Mbps em área aberta, a distância alcançada seria de 750 metros. No caso de operação com a mesma taxa de transmissão da antena interna, ou seja, 250 kbps, o alcance pode chegar a até 1.000 metros, segundo dados do fabricante.

Os resultados dos testes realizados entre os dias 24/01/2017 e 30/03/2017, voltados à validação do dispositivo em campo, demonstraram a eficiência da ação do mecanismo proposto: várias foram as situações em que os espelhos do heliostato apresentavam alta sujidade devido a poeira, fuligem ou mesmo excrementos de pássaros e que, após o funcionamento do dispositivo e a execução de alguns ciclos de limpeza, a refletividade dos espelhos apresentou considerável melhora.

Durante todo o período de testes, as estruturas mecânica, elétrica e também o software controlador mostraram-se apropriados e com correto funcionamento. Em apenas uma ocasião, no mês de março de 2017, houve a necessidade de manutenção no mecanismo proposto, relacionada à lubrificação das estruturas em "C" por onde se movem as rodas de nylon dos *trolleys* que sustentam a escova de limpeza. Destaca-se que esta operação, apesar de ter sido feita com vaselina,

poderia fazer uso de lubrificantes multiuso como o WD-40, graxa branca ou óleo fino de máquina.

Em todas as ocasiões, a gravação dos arquivos de texto referentes ao histórico das operações de limpeza (arquivos .CSV) ocorreu de maneira correta. Ressalta-se que a possibilidade de acompanhar o funcionamento do mecanismo por meio desses arquivos é um dos diferenciais propostos neste estudo.

Os testes finais, realizados em março de 2017 apontaram uma limitação do mecanismo proposto frente à sua operação com os espelhos inclinados em relação ao eixo Y. O torque do motor utilizado nos movimentos de avanço e retorno da escova de limpeza (9,12 N.m ou 93Kg.cm) limita a ação do mecanismo quando as superfícies espelhadas encontram-se inclinadas a 23° ou mais em relação ao solo. Saliencia-se que essa limitação, não desvaloriza a eficácia das operações de limpeza e a eliminação da sujidade quando o heliostato encontra-se em posição de segurança ou quando os espelhos se encontram em valores baixos de inclinação.

Em relação aos custos de produção do dispositivo automático para limpeza de superfícies refletoras de heliostatos, os resultados evidenciam vários pontos positivos deste mecanismo em relação a outra única opção existente no mercado nacional, ou seja, a escavadeira adaptada com escova rotativa e carreta tanque para armazenamento de água. Não somente o valor despendido na construção dos mecanismos é mais viável se comparado ao montante necessário para adquirir tal máquina, como também existem ganhos financeiros relacionados à manutenção; o fato de não ser necessária mão de obra diretamente relacionada à operacionalização; a inexistência de consumo de combustível; tempo de *setup*; armazenamento do maquinário; e pelo fato de não utilizar outra fonte de água senão a proveniente da chuva para efetuar os ciclos de limpeza.

Sobre os objetivos propostos no Capítulo 2, foi possível observar que os atuais procedimentos para a obtenção das licenças ambientais no Brasil precisam ser renovados, padronizados e disseminados. O problema inicial reside na ausência de procedimentos de licenciamento especificamente adaptados para as tecnologias CSP, ainda desconhecidas por muitos.

Em relação aos requisitos legais para uma aprovação bem sucedida para a construção e operação de usinas CSP no Brasil, constatou-se que os aspectos ambientais e tecnológicos são relativamente desconhecidos pelas agências ambientais brasileiras e isso torna o processo de licenciamento ambiental cada vez mais complexo e demorado.

A complexidade dos procedimentos de licenciamento são determinada pela extensão dos impactos ambientais gerados pela usina. Uma vez que as plantas CSP demonstraram ter baixos impactos ambientais, os procedimentos de licenciamento devem ser facilitados.

Os desenvolvedores de projetos que envolvem CSP e os investidores ainda enfrentam barreiras regulatórias baseadas no mercado e impedem a integração desta tecnologia na matriz energética nacional. Este desafio pode ser superado através da implementação de tarifas de feed-in, de créditos fiscais, políticas de benefícios públicos específicos para CSP e por meio de um processo de licenciamento ambiental menos burocrático.

Além disso, os ministérios brasileiros devem trabalhar em conjunto com as agências estaduais e estas, por sua vez, devem trabalhar com as agências municipais para abordar essas barreiras regulatórias de modo abrangente. Estas iniciativas são necessárias para o desenvolvimento sustentável do mercado CSP no Brasil.

Por fim, evidenciou-se o desafio atual das pesquisas voltadas à geração de energia com baixo impacto ambiental e que suporte o crescimento socioeconômico das nações. Neste cenário, o recurso solar mostra-se limpo, não produz qualquer tipo de poluente, renovável e, portanto, atinge os objetivos da sustentabilidade. No Brasil, torna-se necessária uma diversificação da matriz energética, sendo esta muito dependente do recurso hídrico, que, apesar de renovável, tem enfrentado situações adversas, dadas as crises no setor energético ocorridas em 2000/2001 e, mais recentemente, em 2014. Apesar de o país apresentar significativos índices de incidência de radiação solar, este recurso é pífiamente aproveitado. No que se refere à heliotermia, além dos altos índices de radiação solar direta incidentes citados, principalmente na região Nordeste, o Brasil dispõe de outras condições favoráveis para a adoção e implementação desta tecnologia: grande parte das peças usadas

em usinas heliotérmicas são as mesmas utilizadas em usinas convencionais e a indústria brasileira é altamente capacitada para produzir os espelhos e as estruturas metálicas necessárias. A inclusão da energia heliotérmica na matriz energética do país poderia ocorrer, inicialmente, através da agroindústria, setor próspero que, apesar das adversidades econômicas vivenciadas nos últimos anos, apresenta grande capacidade em superar desafios e manter-se competitivo.

REFERÊNCIAS

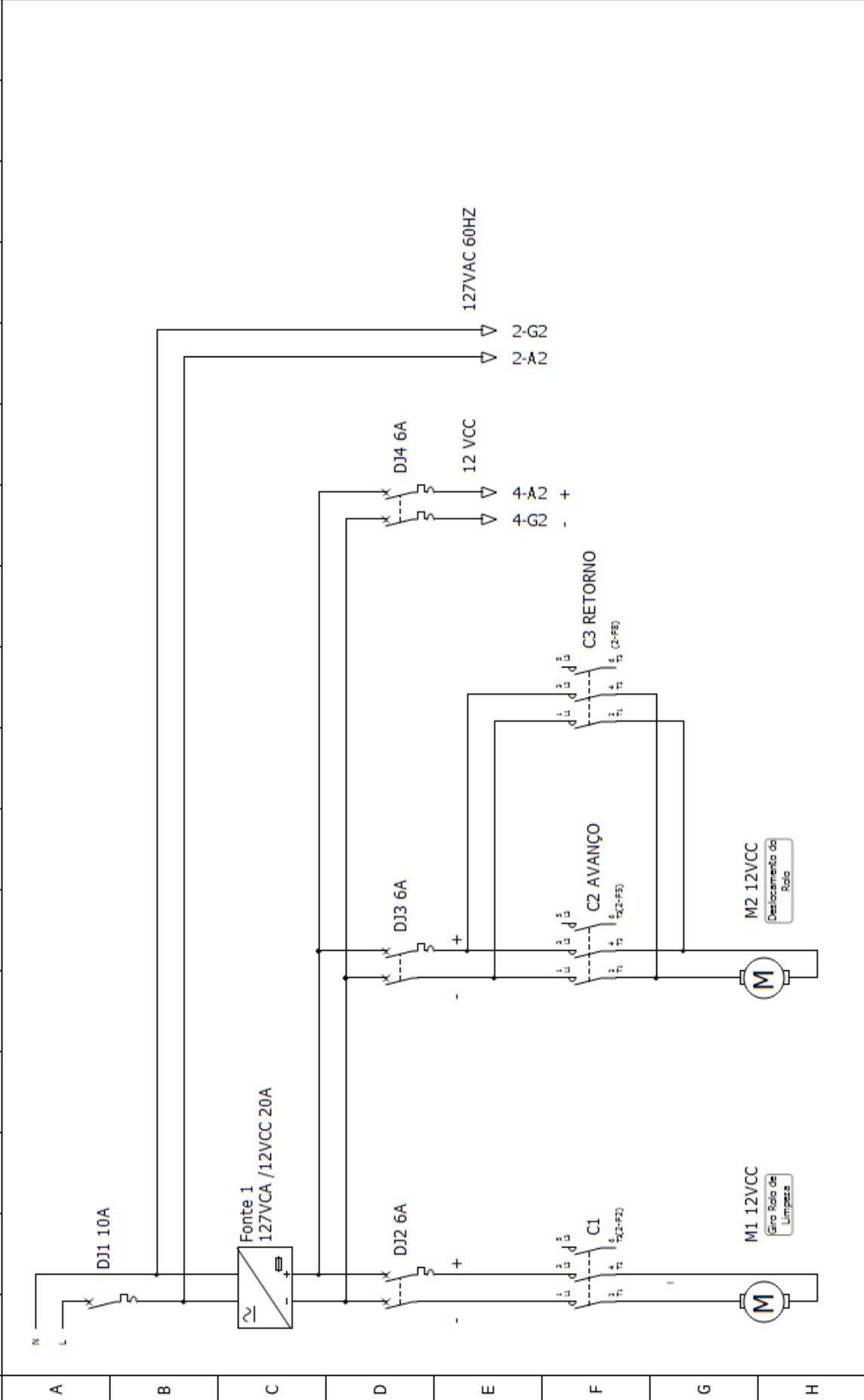
ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Capacidade de geração do Brasil. **Banco de Informações de Geração**, 2016. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 27 mai. 2016.

ENERGIA HELIOTÉRMICA. **O que é energia heliotérmica?**, 2015. Disponível em <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/o-que-e-energia-heliotermica>>. Acesso em 19 abr. 2015.

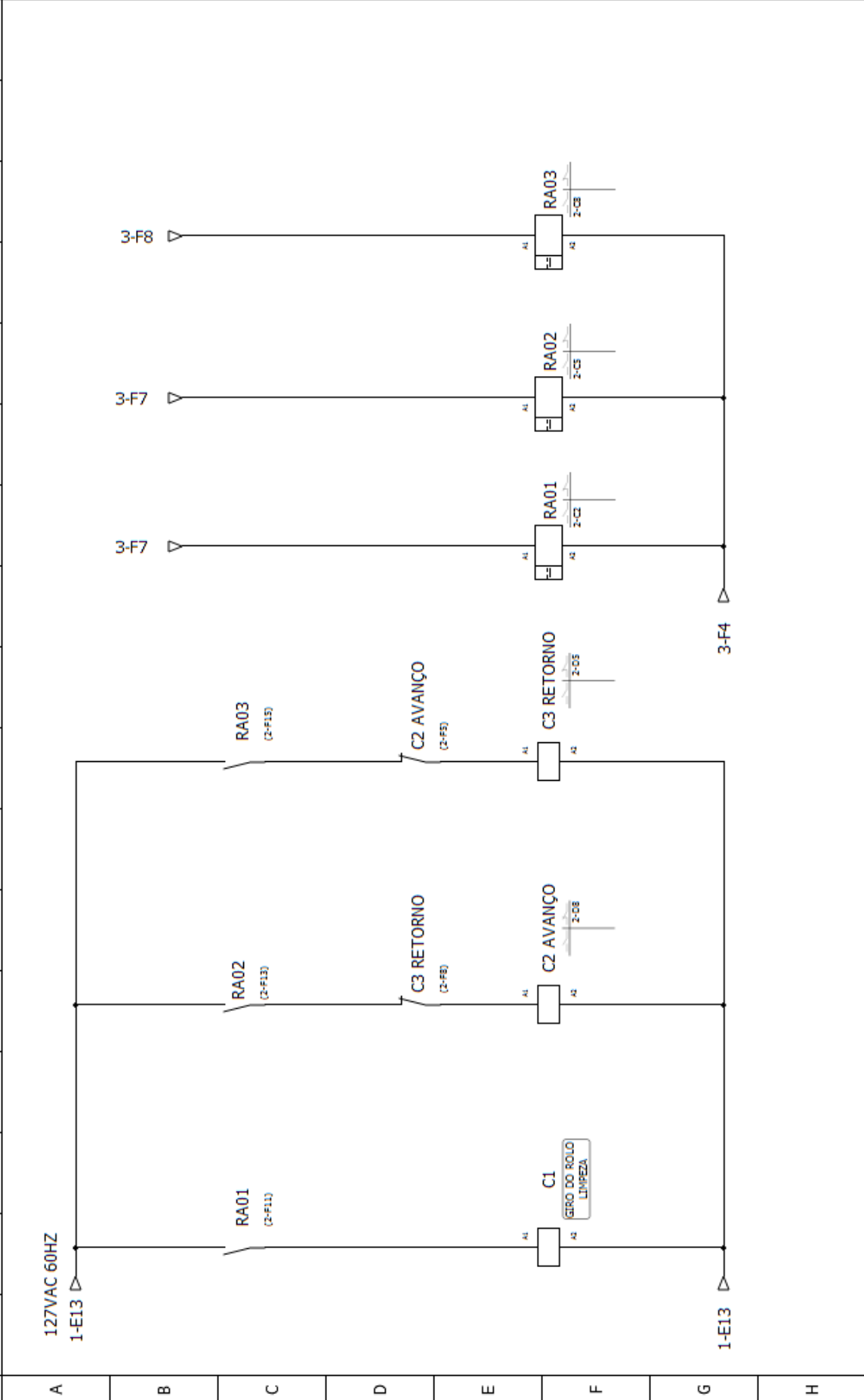
EUSTÁQUIO, J. V. C. S. **Simulação e análise do comportamento do campo de heliostatos de uma central de concentração solar termoelétrica de receptor central**. Dissertação. (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2011.

APÊNDICE 1 – DIAGRAMAS ELÉTRICOS

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----

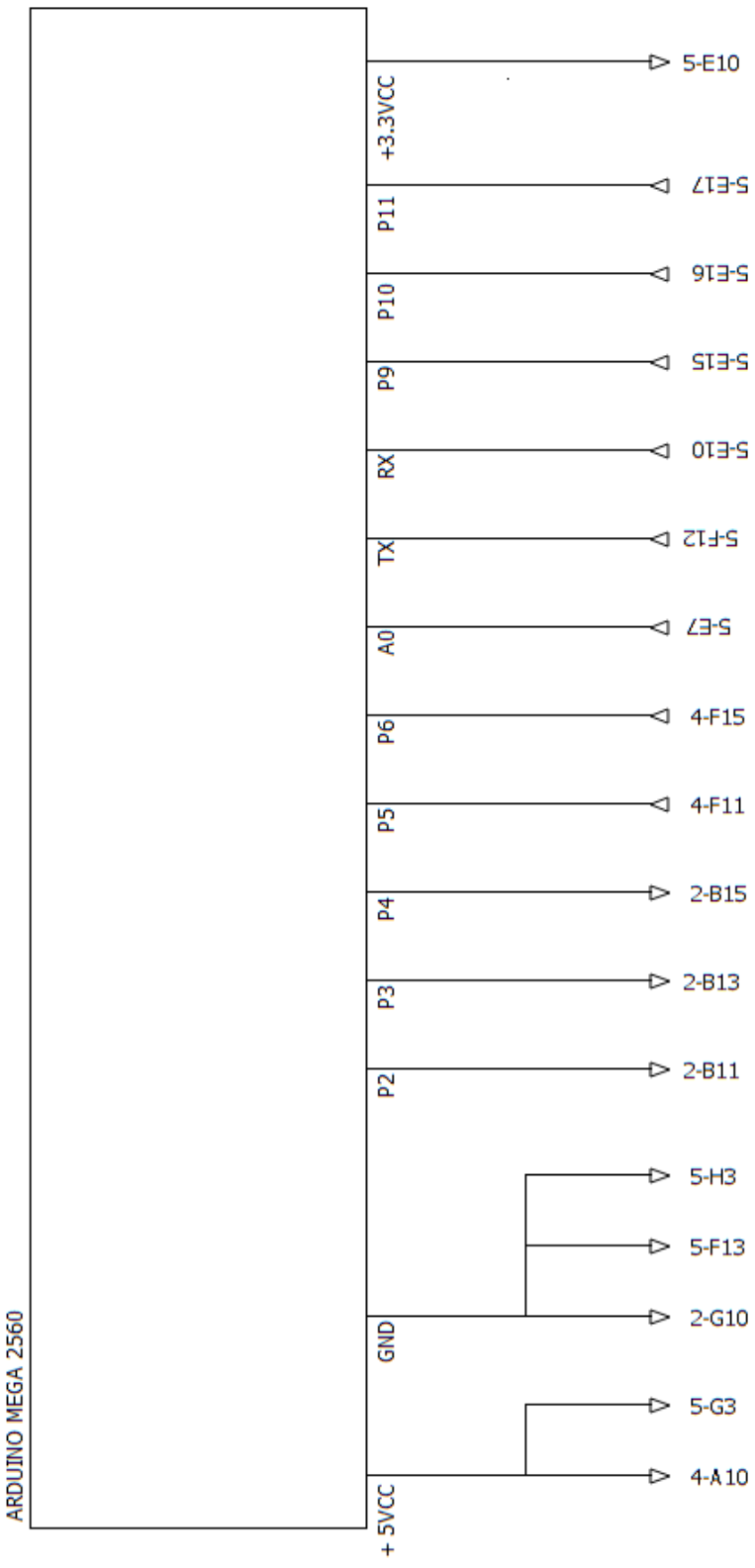


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----



Autor :	CIRCUITO DE COMANDO DOS MOTORES	Ficheiro :
Data :		Folha : 2/5

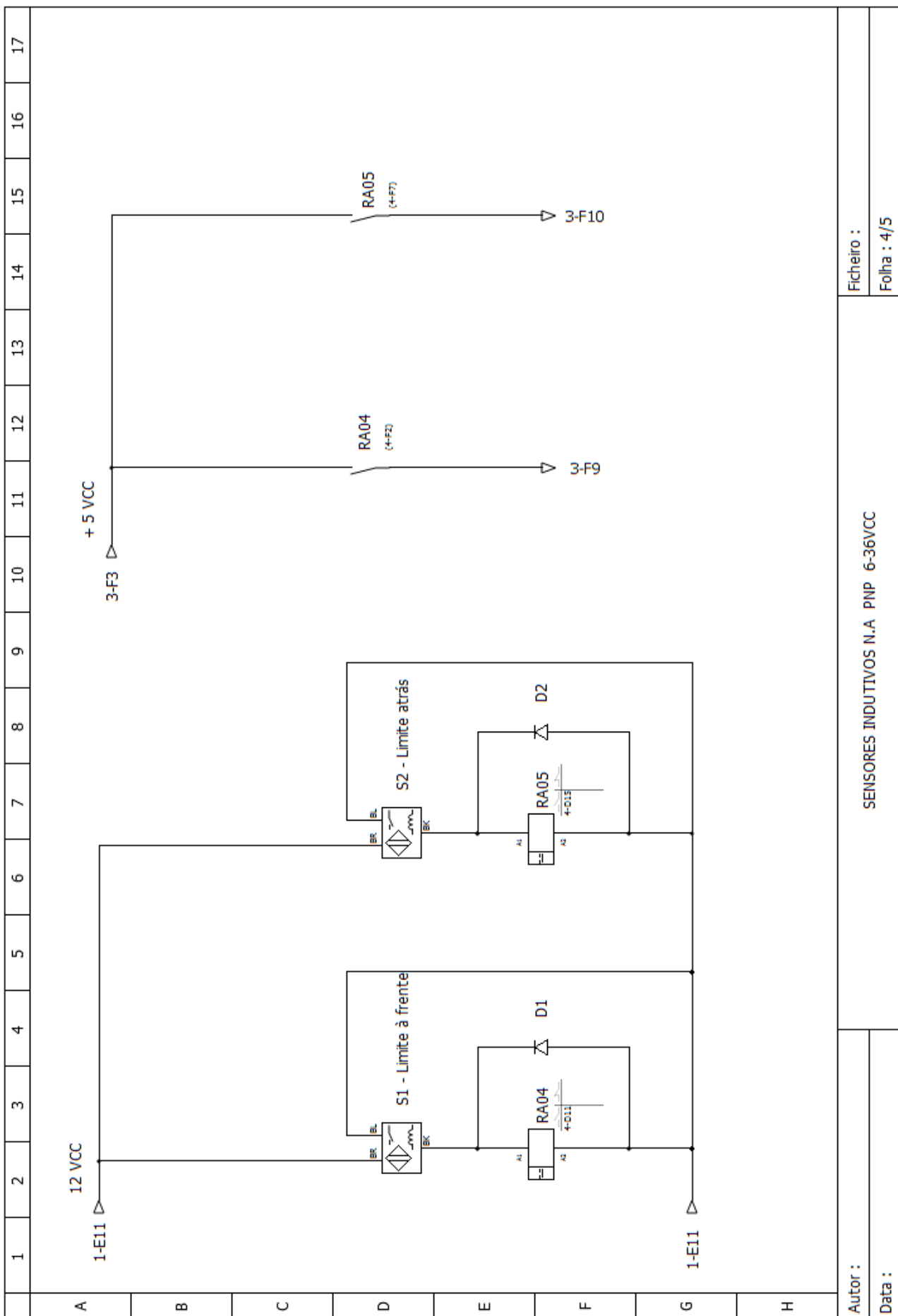
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----



A	B	C	D	E	F	G	H	PORTAS ARDUINO								Ficheiro :	
																Folha : 3/5	

Autor :

Data :



Autor :

Data :

SENsoRES INDUTIVOS N.A PNP 6-36VCC

Ficheiro :

Folha : 4/5

